

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Materiaali- ja kalliotekniikan osasto

Andrei Ollikainen

**OPTOELEKTRONISTEN PIIRILEVYJEN VALMISTUS
MASSATUOTANNOLLISIN MENETELMIN**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten

Espoossa 24.05.2005

Työn valvoja: _____
Professori Jorma Kivilahti
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Työn ohjaaja: _____
DI Marika Immonen
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Tekijä:	Andrei Ollikainen
Työn nimi:	Optoelektronisten piirilevyjen valmistus massatuotannollisin menetelmin
Päivämäärä:	24.05.2005
Sivumäärä:	108
Osasto:	Materiaali- ja kalliotekniikan osasto
Pääaine:	S-113 Elektroniikan valmistustekniikka, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Työn valvoja:	Professori Jorma Kivilahti, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Työn ohjaaja:	DI Marika Immonen, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Avainsanat:	Valokanava, massatuotanto, paneelivalotin, litografia, polymeeri
<p>Tämä diplomityö tehtiin osana TEKESin ja elektroniikkateollisuuden rahoittamaa OHIDA (Optics on Future Printed Circuit Boards in High Speed Data Applications)-projektia. Työn tavoitteena oli tutkia sähköisten piirilevyjen tuotannossa hyödynnetyn infrastruktuurin soveltuvuutta optisten valokanavapiirilevyjen massavalmistukseen paneelivalottimen osalta.</p> <p>Työn kirjallisessa osassa tarkastellaan valokanavapiirilevyjen valmistustekniikat ja mittausten menetelmät massatuotannon näkökulmasta. Lisäksi käsitellään optisilla kytkentärajapinnoilla tapahtuvia ilmiöitä.</p> <p>Diplomityön kokeellisessa osassa valokanavapiirilevyt valmistettiin litografisesti ytimenpeittomenetelmällä kahden eri valotuslaitteen avulla. Mikropiirivalottimella valmistetut valokanavapiirilevyt toimivat vertailunäytteinä paneelivalottimella valmistetuille näytteille. Valottimien teho- ja intensiteettiarvot mitattiin ja säädettiin vastaavanlaisiksi samanlaisten prosessointiolosuhteiden varmistamiseksi. Valokanavien valmistuksessa käytettiin kahta kaupallista epoksipohjaista polymeeriä. Työssä tutkittiin myös piirilevyvalmistajien suosimien filmimaskien soveltuvuutta valokanavien valmistukseen sekä eri litografiamuotojen vaikutusta kanavien suorituskykyihin. Erityistä huomiota kiinnitettiin valokanavarakenteiden karakterisointiin ja valmistusprosessin kriittisten tekijöiden arviointiin.</p> <p>Työssä suoritettujen testien perusteella piirilevyvalmistajille tyypillinen paneelivalotin soveltui valokanavien valmistukseen ainakin signaalin vaimennustulosten osalta. Toisaalta paneelivalottimen kollimoimattoman valonlähteen todettiin aiheuttavan muutoksia valokanavaydinten muotoihin. Lisäksi kuviointialueen ja maskin välinen kontakti osoittautui tärkeäksi tekijäksi valokanavien toimivuuden kannalta.</p>	

Author:	Andrei Ollikainen
Title of thesis:	Mass production of opto/electrical printed circuit boards
Date:	24.05.2005
Number of pages:	108
Department:	Department of Materials Science and Rock Engineering
Major subject:	S-113 Electronics Production Technology, Department of Electrical and Communication Engineering
Supervisor:	Professor Jorma Kivilahti, Department of Electrical and Communication Engineering
Instructor:	M. Sc. Marika Immonen, Department of Electrical and Communication Engineering
Keywords:	Waveguide, mass production, panel exposure, lithography, polymer
<p>The master's thesis was a part of the OHIDA (Optics on Future Printed Circuit Boards in High Speed Data Applications) research project financed by TEKES and Finnish electronics industry. The objective of this thesis was to study possibilities for production of optical waveguides on printed circuit boards with a mass production panel exposure platform. The chosen exposure platform was typical to those in use by printed circuit board manufacturers.</p> <p>In the literature part production and evaluation techniques of opto/electrical circuit boards are presented. Optical interfaces and signal coupling are also described. All aspects are considered from the mass production point of view.</p> <p>In the experimental part epoxy based negative tone photopolymers were chosen to manufacture optical waveguides lithographically. Two different exposure units were used for the purpose: the integrated circuit aligner (IC aligner) and the mass production panel exposure platform. Waveguide boards made by IC aligner were used as a reference to the panel platform samples. Intensity and power of both studied exposure tools were measured and adjusted to ensure similar processing conditions. Possibilities to use film masks for producing optical waveguides were also researched. Special attention was paid to the manufacturing process evaluation. Critical processing parameters were identified for each optical layer of the polymer waveguide structure.</p> <p>The mass production exposure platform was found to be suitable for optical waveguide fabrication due to low signal propagation losses that were measured to be very close to the bulk polymer properties. On the other hand uncollimated light source caused tilted waveguide core geometries. Furthermore, the contact between boards and masks was found to be critical for waveguides' functionality.</p>	

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Sähkö- ja tietoliikenneosaston Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa osana Tekesin tukemaa OHIDA (Optics on Future Printed Circuit Board in High Speed Data Transmission Application) –tutkimusprojektia.

Haluan kiittää työni valvojaa professori Jorma Kivilahtea hyvin mielenkiintoisesta ja haastavasta tutkimusaiheesta sekä työtäni koskevista neuvoista.

Suurimmat kiitokseni osoitan työni ohjaajalle Marika Immoselle hänen tuestaan ja lukuisista neuvoistaan.

Erityinen kiitos kuuluu Pirjo Kontiolle, Kari Lounatmaalle, Ari Kuismalle, Mirja Hytöselle, Riitta Viitalalle sekä Markus Turuselle. Kiitokset kuuluvat myös VTT Oulun Teemu Alajoelle.

Lisäksi haluan kiittää Nadjaa kaikesta saamastani rakkaudesta, tuesta ja kannustuksesta.

Lopuksi haluan kiittää koko sydämestäni rakkaita vanhempiani Elenaa ja Leonidia heidän rajattomasta rakkaudesta ja ymmärryksestä.

Espoossa 24.05.2005

Andrei Ollikainen

Sisällysluettelo

JOHDANTO.....	4
1 POLYMEERIVALOKANAVAN RAKENNE JA TEHTÄVÄT	5
1.1 Eristekerrokset	5
1.2 Ydinkerros	6
1.3 Valmistusalueen merkitys.....	7
1.4 Optisten polymeerien suurpinta-alalevitystekniikat	9
1.4.1 Puhtausvaatimukset ja materiaalihukka	9
1.5 Polymeerivalokanavien valmistus massatuotannon näkökulmasta	10
1.5.1 Kuvionsiirtomenetelmät	10
1.5.2 Replikaatio	12
1.6 Optinen kytkentärajapinta.....	15
1.6.1 Linssit	15
1.6.2 Peilit.....	17
1.6.3 Prismat ja hilat	19
2 POLYMEERIVALOKANAVAT OSANA OPTOELEKTRONISTA PIIRILEVYÄ.....	20
2.1 Integroitu optoelektroninen piirilevy	21
2.2 Passiivinen optoelektroninen piirilevy	23
2.2.1 Valokanava pinnalla	23
2.2.2 Valokanavat piirilevyn sisällä.....	25
3 OPTISTEN POLYMEERIVALOKANAVIEN JA -KALVOJEN MITTAUSMENETELMÄT.....	27
3.1 Sironneen valon mittausmenetelmä.....	27
3.1.1 Menetelmän mittausperiaate ja -asetus	27
3.1.2 Mittausmenetelmän edut ja rajoitukset.....	29
3.2 Katkaisumenetelmä	30
3.2.1 Katkaisumenetelmän mittausperiaate ja -asetus	31
3.2.2 Menetelmän edut ja rajoitukset.....	33

3.3 PrismakytKentä	34
3.3.1 PrismakytKennän mittausperiaate ja –asetus	35
3.3.2 Menetelmän edut ja rajoitukset.....	37
3.4 Tunnettuun liuokseen perustuva upotusmenetelmä.....	38
3.4.1 Upotusmenetelmän mittausperiaate	38
3.4.2 Upotusmittauksen asetukset	39
3.4.3 Menetelmän edut ja rajoitukset	40
4 TYÖN TARKOITUS	42
5 KOKEELLINEN OSA	43
5.1 Työssä käytetyt materiaalit, kemikaalit ja laitteisto.....	43
5.1.1 Valokanavapiirilevyjen valmistuksessa käytetty valotuslaitteisto.....	46
5.2 Valokanavapiirilevyjen vertailukriteerit ja - menetelmät	49
5.3 Vertailunäytteiden valmistus	52
5.3.1 Alakuoren prosessointi	52
5.3.2 Ytimien prosessointi	55
5.3.3 Yläkuoren prosessointi	57
5.4 Valokanavapiirilevyjen valmistus paneelivalottimella	59
5.5 Testisarja kontaktittoman valotuksen tutkimiseksi	61
5.6 Testisarja kalvomaskin avulla paneelivalottimella valmistettujen valokanavapiirilevyjen suorituskvyn arvioimiseksi.....	63
6 VALOKANAVAPIIRILEVYJEN VALMISTUSPROSESSIN TARKASTELU	64
6.1 Alakuoren valmistusprosessin kehitys	64
6.1.1 Alakuoren defektien ehkäiseminen ja kriittisen vaiheen arviointi	66
6.2 Valokanaydinten valmistusprosessin kehitys.....	67
6.2.1 Valokanavaydinten defektien ehkäiseminen ja kriittisen prosessivaiheen arviointi	71
6.3 Yläkuoren valmistusprosessin kehitys	72
6.3.1 Yläkuoren defektien ehkäiseminen ja kriittisen parametrin arviointi....	74
7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	76
7.1 Vertailunäytetestisarjan tulokset	76

7.2 Paneelivalottimella valmistettujen valokanavapiirilevyjen tulokset.....	79
7.3 Kontaktittoman valotuksen testisarjan tulokset	85
7.4 Kalvomaskin avulla paneelivalottimella valmistettujen valokanavapiirilevyjen mittatulokset.....	87
7.5 Testitulosten analysointi ja vertailu	90
8 YHTEENVETO	94
LÄHDELUETTELO	96
LIITTEET	107

Johdanto

Elektroniikkateollisuuden nopea kehitys on viemässä perinteisiin tiedonsiirtoväyliin perustuvat teknologiat äärirajoilleen. Kellotaajuuksien kasvaminen yhdistettynä yhä pieneneviin viivaleveyksiin on pakottanut etsimään uusia lähestymistapoja signaalin luotettavan käsittelyyn ja siirtämiseen.

Lasi- ja polymeeripohjaiset kuidut ovat tarjonneet vartenotettavan vaihtoehdon kuparipohjaisille teknologioille. Niiden merkitys on korostunut erityisesti pitkän matkan laajakaistaisissa tiedonsiirroissa. Toisaalta myös piirilevytasolla on esitetty useita kuitupohjaosia ratkaisuja, mutta ne eivät ole vastanneet kaikkia niille asetettuja vaatimuksia ja odotuksia mm. kustannusten, kokoonpanoprosessien yhteensopivuuden ja integrointitiheyksien suhteen.

Matalahäviöisten polymeerimateriaalien kehitys on tarjonnut uusia tapoja optiikan ja fotonikan integroimisessa osaksi sähköistä piirilevyä. Yksi niistä on optisten polymeerien käyttö signaalin siirtoväylinä. Polymeerivalokanavatekniikan kehityksen kulmakivenä voidaan pitää eri materiaalien ja prosessien yhteensopivuutta. Toisaalta optiset polymeerit mahdollistavat erikoistiheiden optoelektronisten piirilevyjen valmistamisen kustannustehokkaasti.

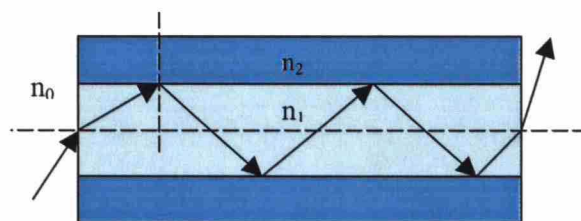
Suurten piirilevyvalmistajien lisääntynyt kiinnostus optisten piirilevyjen valmistukseen on tuonut uusia painopisteitä tutkimustyöhön. Yksi tärkeimmistä painopisteistä on ollut PCB-levyjen tuotannossa käytetyn infrastruktuurin soveltaminen optoelektronisten piirilevyjen massavalmistukseen. On siirryttävä pääasiassa puhdastiloissa tapahtuvasta pienvolyymisestä optisten levyjen valmistuksesta suurtuotantoympäristöön, jossa polymeerivalokanavien luotettava ja toistettava suurpinta-alaprosessointi tulee luultavasti olemaan avaintekijänä.

1 Polymeerivalokanavan rakenne ja tehtävät

Polymeerivalokanavan tehtävänä on toimia optisen signaalin siirtoväylänä, joka koostuu valokuidun tapaan ytimestä ja sitä ympäröivistä eristekerroksista. Valon eteneminen tapahtuu ydintä pitkin, jonka poikkileikkauspinta-ala vaihtelee mm. kanavan aaltomuodosta (yksi- ja monimuoto) riippuen muutamista mikrometreistä yli sataan mikrometriin. Yksimuotoisen valokanavan ytimen halkaisija on 3-10 μm ja monimuotokanavan 20-1000 μm . Edellisen tapauksessa kanavassa pystyy kulkemaan kerrallaan vain yhdellä taajuudella oleva signaali. Jälkimmäinen mahdollistaa eri taajuuksilla olevien signaalien samanaikaisen etenemisen, joskin vaarana on pulssin leviäminen pitkillä siirtomatkoilla. /1, 2, 3, 4/

1.1 Eristekerrokset

Eristekerrokset luovat edellytyksen valosignaalin etenemiselle ytimessä Snellin lain periaatteen mukaisesti. Suuremman taitekertoimen omaavan ytimen (n_1) ja eristeen (n_2) rajapinnalla valo läpikäy kokonaisheijastuksen kuvan 1 osoittamalla tavalla. /3/



Kuva 1. Valon eteneminen kanavan ytimessä. /3/

Eristekerrokset voidaan jakaa ala- ja yläkuoreen niiden valmistusjärjestyksen perusteella. Ne toimivat myös mekaanisena ja kemiallisena suojana ytimelle. Alakuoren merkitys korostuu substraatin mahdollisten epätasaisuuksien tasaamisessa signaalin häiriöttömän kulun varmistamiseksi. Lisäksi sillä on oltava hyvä kostutus, adheesio ja mekaanis-kemiallinen yhteensopivuus PCB-levyjen valmistuksessa käyttämiin materiaaleihin ja komponentteihin, kuten mm. kuparijohtimiin, lasiin ja

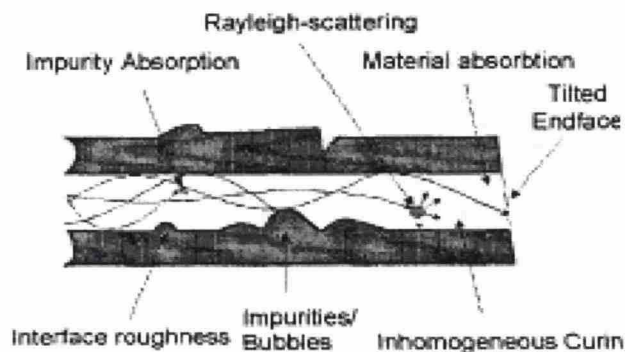
piihin, koska optiikan kustannustehokas integrointi osaksi sähköistä piirilevyä edellyttää valokanavarakenteen prosessoimista olemassaolevan tuotantoinfrastruktuurin puitteissa. /2, 4, 5, 6/

Yläkuori puolestaan voi valon ohjauksen ohella toimia mm. kohdistus- ja/tai juotemaskina, mikäli sähköisten komponenttien ladonta suoritetaan samalle piirilevyllä optisen moduulin valmistamisen jälkeen. Tällöin sen on mm. kyettävä suojaamaan ydintä hetkellisistä lämpötilapiikeistä massatuotantoprosessin yhteensopivuuden varmistamiseksi. /2, 7, 8/

1.2 Ydinkerros

Ydin on tärkein osa rakennetta koko polymeerivalokanavan luotattavan toiminnan osalta, koska hyvin suuri osa kanavan valmistuksessa tapahtuvista kriittisistä tekijöistä liittyy juuri ydinkerrokseen. Mm. epäpuhtaudet, ilmakuplat ja –taskut, sivuseinämän karheus ja geometrinen muoto heikentävät tavanomaisten optisten defektien rinnalla kanavan toimintaa signaalin siirtoväylänä (kuva 2). /9/

Kuva 2. Valokanavan toiminnallisuutta heikentävät tekijät. /9/



Pitkissä väylissä kanavaytimen sivuseinämän karheuden merkitys korostuu. Sivuseinäämä määreytyy hyvin pitkälle valmistusprosessissa, ja siitä johtuvien optisen

tehon menetysten täydelliseksi minimoimiseksi karheuden on oltava kymmenesosa ytimessä etenevän signaalin aallonpituudesta /9, 10/.

Massavalmistuksen näkökulmasta niin yksi- kuin monimuotokanavien valmistus on realistissa olemassaolevan laitteiston osalta, mutta ottaen huomioon PCB-levyjen tuotantolinjojen ladontatoleranssien suuruudet ($\pm 40 \mu\text{m} \dots \pm 70 \mu\text{m}$), monimuotokanavat saattaa olla toteutuskelpoisempi ratkaisu niiden suuremman poikkipinta-alan ansiosta. /10, 19/

1.3 Valmistusalueen merkitys

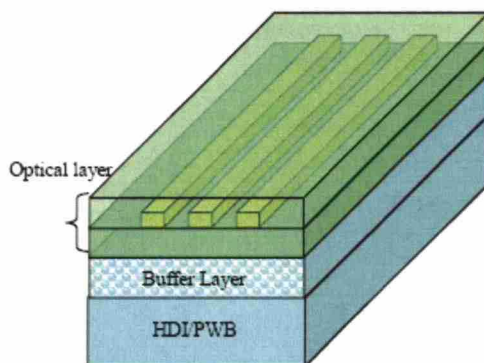
Perinteisesti integroidun optiikan substraattimateriaalina on käytetty kiillotettuja pii- ja lasikieikkoja mm. niiden erinomaisen nanometriluokan planaarisuuden ja pitkän käyttöhistorian takia /16, 18/.

Massatuotannon näkökulmasta piirilevyvalmistajien käyttämät tavanomaiset lasikuituvahvistetut epoksihartsilevyt eli FR4 ovat olleet voimakkaan mielenkiinnon kohteena, ja niillä on toteutettu useita toimivia optisen datasiirron piirilevykokonaisuuksia /12/.

FR4:n termomekaaniset ominaisuudet ovat huomattavasti lähempänä optisten polymeerien ominaisuuksia, joista lämpölaajenemiskerroin on merkittävin yksittäinen tekijä. Kaupallisten valokanavapolymeerien CTE vaihtelee 25:n ja 90 ppm/°C:n välillä FR4:n kertoimen ollessa lasikuitusuunnassa 15 ppm/°C ja kiekon 2,6 ppm/°C. /2, 13, 14, 16/

Toisaalta kuituvahvistetun epoksihartsilaminaatin ehdottomasti ongelmallisin puoli liittyy sen paksuusvaihteluihin z-suunnassa ja planaarisuuteen, mikä saattaa vaikuttaa komponenttien liittämistarkkuuteen. Kyseisen ongelman vaikutuksen minimoimiseksi on esitetty erillisen välikerroksen lisääminen ennen alakuoren applikointia (kuva 3),

mikä tarkoittaa ylimääräisiä prosessointivaiheita. /3/. Sen käyttöä voidaan kuitenkin välttää mm. kasvattamalla alakuoren paksuutta ja/tai valitsemalla tarpeeksi hyvän planarisointikyvyn omaavan polymeerin /15/.



Kuva 3. Välikerroksen käyttö FR4 substraatin epätasaisuuden vaikutuksen minimoimiseksi. /3/

Joidenkin optisten polymeerien, kuten polyimidien, vaatimat prosessointilämpötilat ylittävät tavallisen FR4 laminaatin lasittumispisteen johtaen mahdollisesti koko valokanavan toimimattomuuteen substraatin käyristymisen myötä. Tällöin on käytettävä korkean lasisiirtymälämpötilan FR4- tai muita erikoisalustoja. /8/

Taulukossa 1 esitetty kiillotetun piikiekon, FR4 substraatin ja erittäin matalan optisen vaimennuksen omaavan akrylaattipohjaisen (alle 0,05 dB/cm signaalin aallonpituudella 840 nm) polymeerin ominaisuuksien vertailu. /2, 16, 17/

Taulukko 1. Kiillotetun piikiekon,FR4:n ja TruemodeTM:n ominaisuudet.

Ominaisuus	Kiekk	FR4	Truemode TM
CTE-kerroin (ppm/°C)	2,6	15*	60
Planaarisuus/paksuusvaihtelu	±1 nm	±25 µm	**
Lasittumislämpötila T _g (°C)	---	160 ± 5	150
Hajoamislämpötila T _m (°C)	1414***	> T _g	350

* = FR4:n lasikuitusuunta;

** = riippuu levitysmenetelmästä, topografiasta ja tavoitepaksuudesta;

*** = piikiekon sulamislämpötila.

Toisaalta ehdoton edellytys valokanavapiirilevyjen valmistusprosessin massavalmistukselle on yhteensopivuus tavanomaisen PCB-levyjen tuotantoinfrastruktuurin kanssa, mikä korostaa entisestään FR4 tyyppisten alustojen käyttöasemaa. Lisäksi EU:n alueella vuonna 2006 voimaan astuva lyijyttömyysdirektiivi asettaa osaltaan ehtoja substraatin valinnalle, jolloin juottamislämpötilojen kasvaessa FR5, G-11 tai CEM-3 voisivat soveltua paremman lämmönkestävyyden perusteella valokanavapiirilevyjen valmistukselle. /2, 3, 18/

1.4 Optisten polymeerien suurpinta-alalevitystekniikat

Piirilevyjen valmistuksessa runsaasti käytetyt silkkipaino-, ruiskutus-, verhopinnoitus- ja rullalevitysmenetelmät voisivat soveltua polymeerivalokanavien massatuotantoon. Kyseiset menetelmät ovat paljon tutkittuja, ja piirilevyvalmistajilla on olemassa niille hyvin kontrolloidut ja toistettavat prosessispektrit sekä koulutettu henkilökunta, mikä minimoi uusien materiaalien käsittelyn sisäänajokustannuksia. /19, 20/

Polymeerin viskositeetti on suurin yksittäinen menetelmän valintaan vaikuttava tekijä. Hyvin korkean viskositeettiluvun omaavat optiset resistit eivät sovellu levitettäväksi ruiskuttamalla, mutta silkkipaino saattaa sopia. Muita tekijöitä ovat optisen kerroksen tavoitepaksuus ja erityisesti materiaalin vaatimat mahdolliset jälkikäsittelyt, kuten paistot ja seisotukset, ovat myös avainasemassa polymeerien mekaanisten ja optisten ominaisuuksien rinnalla levitystekniikan valinnassa. /2, 10, 19, 21, 22/

1.4.1 Puhtausvaatimukset ja materiaalihukka

Erityistä huomiota tulisi kiinnittää myös puhtausvaatimuksiin ja materiaalihukkaan. Puhtausvaatimukset korreloivat voimakkaasti valokanavien luotettavan ja toistettavan valmistuksen kanssa, sillä epäpuhtauden aiheuttavat kanavassa etenevän optisen

signaalin sirontaa ja/tai ylimääräistä absorptiota, silloin kun liiallinen materiaalihukka nostaa kustannustasoa. /9, 23/

1.5 Polymeerivalokanavien valmistus massatuotannon näkökulmasta

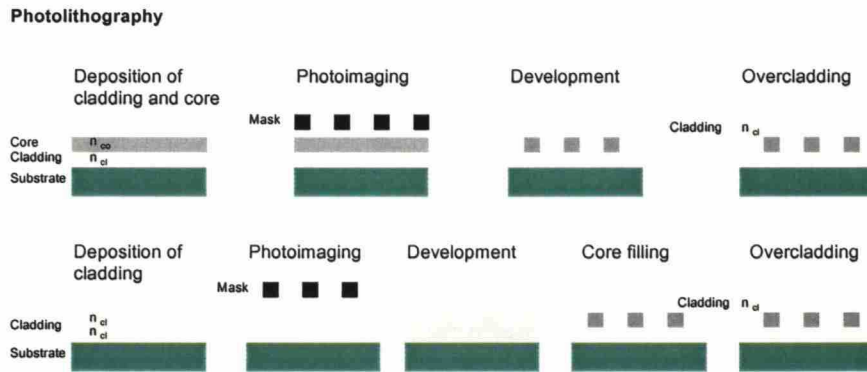
Polymeerivalokanavien valmistusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: kuvionsiirtomenetelmät, replikaatio ja selektiivinen kasvatus, joista kuvionsiirtomenetelmällä ja replikaatiolla arvioidaan olevan suurin potentiaali ja soveltumismahdollisuus valokanavapiirilevyjen tuotantoprosessin integroimiseksi osaksi PCB-levyjen tuotantolinjastoa, koska piirilevyvalmistajilla on valmiutta ja käyttökokemusta vastaavista prosesseista niin laitteiston kuin henkilökunnankin osalta. /2, 9, 19, 24, 25/

On myös muita polymeerivalokanavien valmistustekniikoita, kuten ulkoisesti ja sisäisesti ohjattu lisääaineiden diffuusio matriisissa polymeerivalokanavarakenteen muodostumiseksi, mutta ne vaativat molekyylien orientaatiota sähkökentän avulla, jolloin ne kuuluvat nk. aktiivisten optisten polymeerien ryhmään /26/, joka on rajattu tämän diplomityön ulkopuolelle.

1.5.1 Kuvionsiirtomenetelmät

Kuvionsiirtomenetelmä toteutetaan valolitografialla tai laserin avulla. Edellisessä kuviointi tapahtuu maskin kautta kontakti tai kontaktittomassa moodissa UV-säteilyllä, jonka aallonpituus riippuu valotettavan polymeerin absorptioherkkyydestä ja -piikeistä, ja yleisimmillään on 350-400 nm /19, 27/.

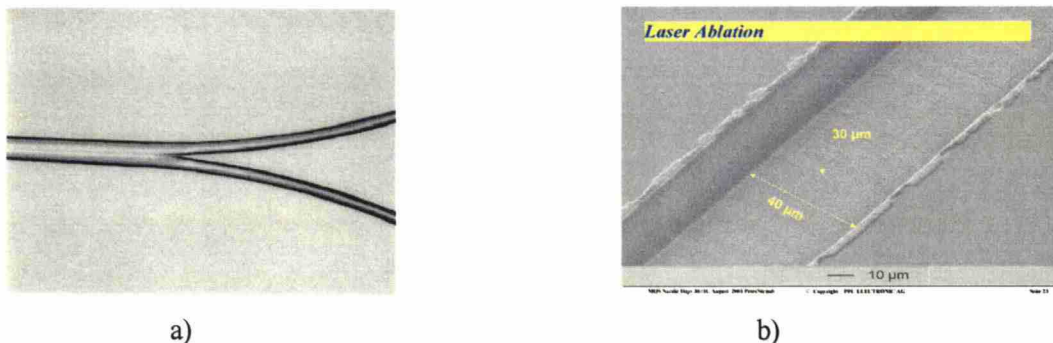
Kuvassa 4 on esitetty litografisesti ytimenpeitto- ja uratäyttömenetelmien avulla valmistetut kanavat /24/.



Kuva 4. Valolitografisesti ytimenpeitolla ja uratäytöllä valmistetut valokanavat. /24/

Uratäyttömenetelmässä kuviointi tapahtuu laserin avulla ilman maskia suorakuviointilla tai ablaatiolla. Suorakuviointi soveltuu erityisesti pitkien valokanavien muodostamiseen, joiden valmistus mikropiirituotantoon tarkoitetuilla valotuskohdistimilla on mahdotonta mm. laitekohtaisten rajoitusten vuoksi. Laserablaatiossa kyse on polymeerin mekaanisesta työstämisestä, jolloin materiaali ei kuitenkaan poistu höyrystymällä tai palamalla. /12, 24/

Kuvassa 5 on esitetty lasersuorakuviointilla valmistettu optinen haaroitinkomponentti ja ablaation aikaansaama ura. /24/



Kuva 5. Lasersuorakirjoituksella valmistettu haaroitin (a) /12/ ja ablaation tekemä ura (b) /24/.

Laserkuvioinnin osalta on esitetty vain laboratoriomittakaavan pienvolyyminen valokanavien valmistus piirilevytasolla tämän diplomityön kirjoittamisajankohdalla. Toisaalta PCB-levyjen massavalmistajilla on olemassa valmiudet siihen niin vastaavanlaisen laitteiston kuin henkilökunnankin osalta. Maskittomuus, selektiivisuus, suurpinta-alan prosessointimahdollisuus, nopeus ja kuvioinnin hyvä kontrollointi puhuvat kyseisen menetelmän puolesta. /12, 19, 24/

1.5.2 Replikaatio

Replikaatio on periaatteessa fysikaalis-mekaaninen kuvion muodostusmenetelmä, jossa optinen polymeerikerros voidaan muokata haluttuun muotoon reaktiivisella ionietsauksella, kohokuvioinnilla, ruiskupuristuksella tai niiden yhdistelmällä valolitografian kanssa. /2, 9, 25/

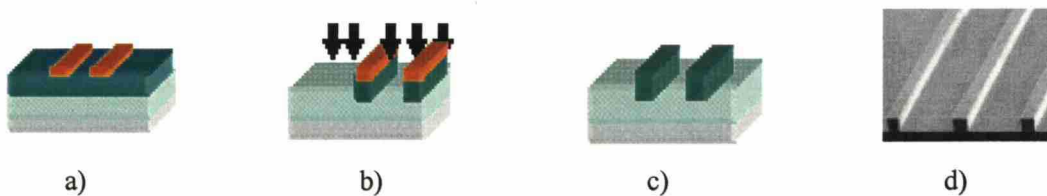
Reaktiivisessa ionietsauksessa (RIE) polymeerikerros pommitetaan litografisesti muodostetun oksidi- tai resistimaskin lävitse varatuilla hiukkasilla. Massavalmistuksen kannalta RIE:n soveltuminen valokanavien valmistamiseen riippuu kokonaan etsattavasta polymeeristä, jolloin sen ominaisuudet ja geometriset dimensiot vaikuttavat suoraan etsausnopeuteen. Toinen hyvin tärkeä tekijä liittyy RIE:n laitekohtaisiin ominaisuuksiin, jolloin prosessissa käytettyjen kaasujen suhde, syötönnopeus ja elektrodien jännite määrittävät osaltaan etsautumisvauhdin. /16/

Näin ollen monimuotovalokanavien valmistus RIE:llä on ollut hyvin haasteellista sellaisten optisten polymeerien osalta, joiden etsautumisnopeus on mikrometrin luokkaa tunnissa, mikä nostaa läpimenoaikoja ja kustannuksia. Toisaalta erittäin matalan signaalin vaimennusarvon omaavien metakrylaattipohjaisen yksimuotovalokanavien muodostus on hyvin nopea ja kontrolloitu prosessi. /28/

Maskin käyttö ei ole välttämätöntä reaktiivisessa ionietsauksessa, vaan selektiivisyys voidaan saavuttaa valottamalla litografisesti haluttu kanavamuoto

ristisilloitusreaktion käynnistämiseksi, jolloin sen etsautumisnopeus pienenee dramaattisesti, ja vain kemiallisesti heikompi valottumaton alue poistuu RIE:ssä. /28/

RIE:n ehkä suurin ongelma liittyy polymeerivalokanavien sivuseinämän karheuteen, jonka on periaatteessa oltava kymmenes osa signaalin aallonpituudesta signaalivaimennusten täydelliseksi minimoimiseksi. Kuvassa 6 on esitetty maskillisen RIE-prosessin valokanavavalmistuksen vaiheet. /10, 13/

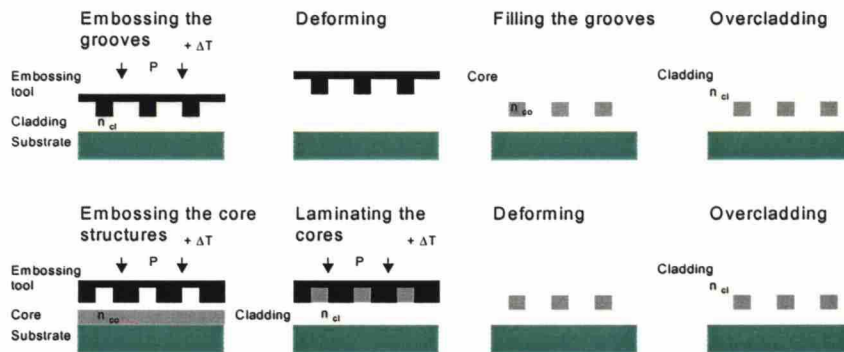


Kuva 6. RIE etsauksen vaiheet alakuoren ja ydinkerroksen applikoinnin jälkeen: a) etsausmaskin muodostus oksidikalvosta tai resististä; b) suojaamattoman polymeerin RIE-kaasuseosetsaus; c) ja d) valmis valokanavarakenne. /13/

Toinen replikaatiomenetelmä, jota on kehitetty erityisesti kanavien massatuotantoa silmällä pitäen on kohokuviointi, jossa erikoisen nikkelityökalun avulla painetaan valokanavarakenne alakuoreen tai suoraan ydinkerrokseen. Alakuoren tapauksessa muodostuneet urat täytetään sopivalla ydinmateriaalilla mm. stensillipainoon soveltuvalla levityslastalla. Nikkelityökalun lisäksi voidaan käyttää myös kumimuotia. /9, 24, 25, 30/

Kuvassa 7 on esitetty alakuoreen ja suoran ydinkerrokseen painetut valokanavaratkaisut. /24/

Hot embossing



Kuva 7. Kohokuviointireplikaatio uratäytöllä (ylempi kuva) ja ydinkerroksen muokkauksella. /24/

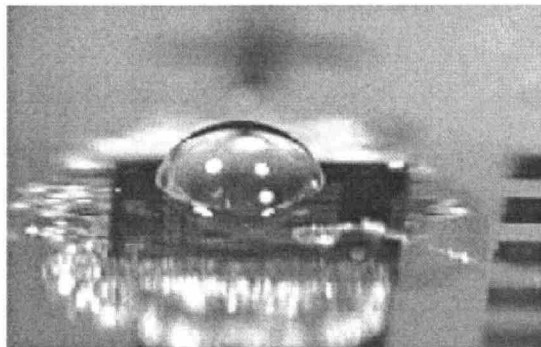
Kohokuviointimenetelmän etuna on nopeuden lisäksi se, että piirilevyvalmistajilla on runsaasti kokemusta vastaavanlaisista termokompressioprosesseista niin laitteiston kuin henkilöstönkin suhteen, jolloin valmistustekniikan integrointi nykyiseen PCB-levyjen suurtuotantolinjastoon on realistinen vaihtoehto. Lisäksi erikoisvalmistetun nikkelimuodin avulla voidaan päästää jopa 10 nm:n luokan polymeerikanavan sivuseinämäkarheuteen. Tällöin prosessikustannukset nousevat erikoistyökalun kalleuden takia. /9, 19, 30/

1.6 Optinen kytkentärajapinta

Valokanavan toimessa osana sähköoptista kokonaisuutta signaalin kulkusuunnan ohjaus on tärkeä koko levyn toiminnan kannalta. Polymeerivalokanavan sisään- ja ulostulorajapinnoilla signaali voidaan ohjata erillisten tai itse kanavarakenteeseen valmistettujen optisten komponenttien avulla, kuten peileillä, linsseillä, prismoilla ja hiloilla /22/, joiden merkitystä tarkastellaan niin massavalmistuksen kuin integroinninkin kannalta.

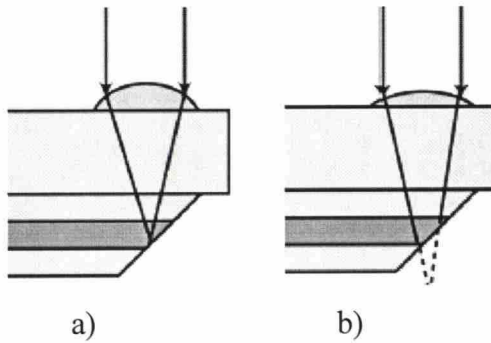
1.6.1 Linssit

Mikrolinssejä käytetään integroidussa optiikassa tyypillisesti valosäteiden kokoamiseen ja yhdensuuntaistamiseen. Linssi voidaan sijoittaa mm. valoa emittoivan komponentin aktiivisen alueen (kuva 8), valokanavan ja/tai ilmaisimen eteen. /31/



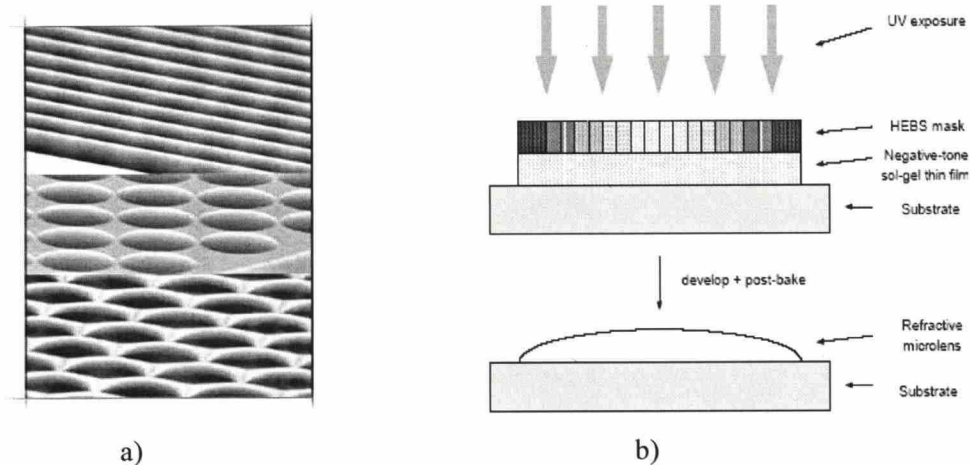
Kuva 8. Linssi ja VCSEL-komponentti. /45/

Kollimointiin vaikuttaa ratkaisevasti linssin fokusointi eli f-luku, johon puolestaan vaikuttaa mm. linssin kaarevuussäde (kuva 9) /31/



Kuva 9. Valon fokusointi kanavaytimeen. /31/

Suurtuotannon kannalta linssien yleisin valmistusmenetelmä valokuvioidusta polymeeristä valmistettujen suorakaiteen muotoisten kuvioiden ”sulattaminen” uunissa, jolloin kuvion muoto muuttuu pintajännityksen ansiosta suorakaiteisesta linssimäiseksi /16/. Toinen hyvin kätevä menetelmä on harmaasävyliitografia (kuva 10 a) /32/, jossa maskikuvion optinen tiheys muuttuu asteittain (kuva 10 b), jolloin kuvioituvan resistin absorboima valomäärä pienenee maskikuvion ”tummuuden” kasvaessa /33/.



Kuva 10. Linssit harmaasävyliitografian avulla (a). Harmaasävyliitografian periaate (b). /32, 33/

Optiikan integroinnissa linssien avulla voidaan mm. parantaa komponentin kohdistusepäarkuudesta johtuvia kytkentämenetyksiä. /31/

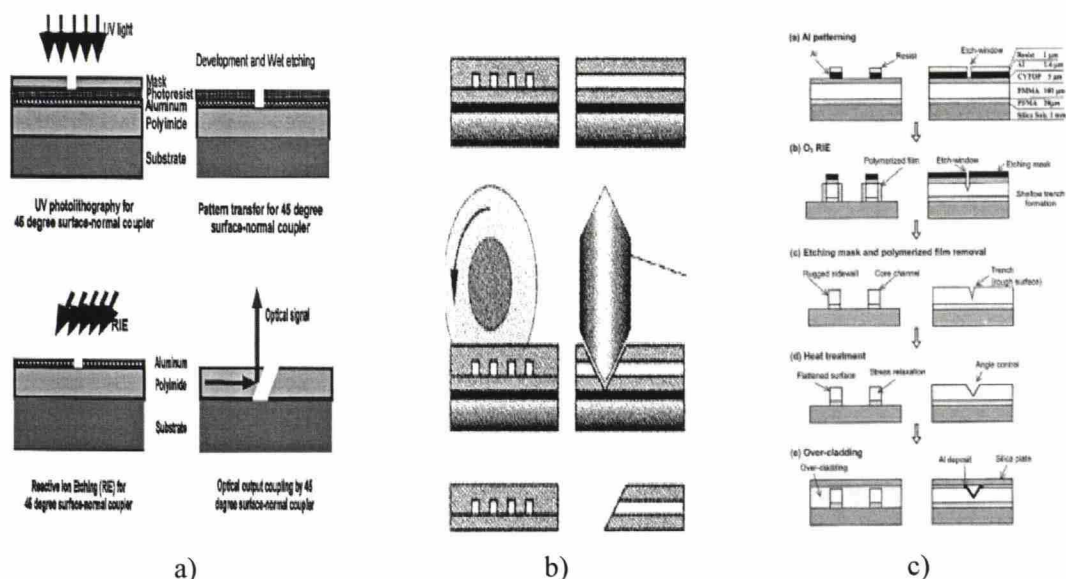
Massavalmistuksen näkökulmasta erillisten linssirakenteiden ladonta PCB-kokoonpanolinjastolla riippuu mm. kanavan poikkipinta-alasta ja prosessilämpötiloista. Edellinen vaikuttaa suoraan kohdistustoleransseihin ja jälkimmäinen reflow-profiiliin, jonka maksimilämpötilat ja kesto asettavat ehtoja linssimateriaalin valinnassa. /10, 34/

Toisaalta valmistaessa linssejä litografisesti voidaan päästää tarkempaan kohdistustarkkuuteen tavanomaisen kokoonpanolinjastoon nähden, jonka tarkkuudeksi on arvioitu siis $\pm 40 \dots \pm 70 \mu\text{m}$, silloin kun semiautomaattisella valottimella $0,2 \mu\text{m}$:n tarkkuus on saavutettavissa. Toisaalta ylimääräisen prosessivaiheen lisäys nostaa läpimenoaikoja ja kasvattaa kustannuksia. /10, 19, 35/

1.6.2 Peilit

Peilien avulla voidaan toteuttaa valosäteen kytkentää lähettimestä valokanavaan ja siitä ilmaisimeen. Yksinkertaisin ratkaisu on liittää peilikappale erilliskomponenttina kanavarakenteen pätyyn. Tarkkojen kohdistusvaatimusten vuoksi on alettu tutkia mahdollisuuksia valmistaa mikrobeili suoraan valokanavaan ns. integroituna peilikomponenttina. /15, 22/

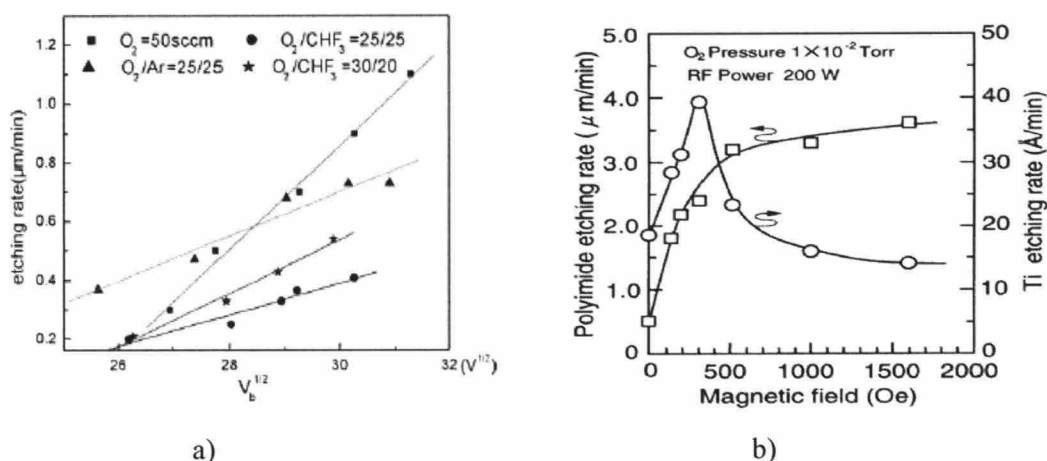
Kanavaan integroituja mikrobeilejä on valmistettu mm. käyttäen reaktiivista ionietsausta (RIE) (kuva 11 a), sahausta V-muotoisella terällä (kuva 11 b) ja hybridistä menetelmää (kuva 11 c). Myös harmaansävy litografia soveltuu peilien valmistukseen. /31, 33, 36, 37/



Kuva 11. Mikropeilien valmistustavat: a) RIE /36/; b) V-sahanterä /37/; c) hybridi /38/.

Mahdollisimman täydellisen heijastumisen varmistamiseksi pelien toinen puoli pinnoitetaan usein sputteroimalla valoa heijastavilla materiaaleilla, joista alumiini on yleisin /22/.

Kuvassa 12 on esitetty yleisten valokanavarakenteiden valmistuksessa käytettyjen optisten passiivipolymeerien etsautumisnopeudet laitekohtaisten tekijöiden funktiona: PMMA:n ja polyimidin prosessointi. /40, 41/



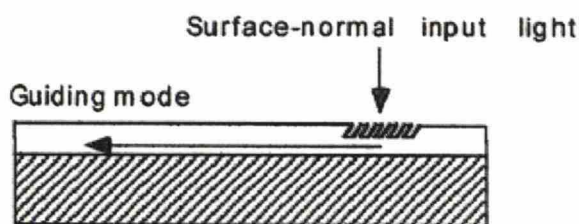
Kuva 12. PMMA:n (a) ja PI:n /40/ (b) REI-etsaus /41/ eri prosessitekijöiden funktiona.

Toisaalta monimuotovalokanavien tapauksessa RIE-käsittely voi olla erittäin hankala ja pitkä prosessi jo pelkästään valokanavien dimensioiden takia. Lisäksi RIE-prosessin tuloksena muodostuneen peilipinnan karheus on suorituskyykyyn vaikuttava suurin yksittäinen tekijä. /2, 42/

Peilirakenteet voidaan valmistaa myös polymeerivalokanavan päätyihin samassa litografiavaiheessa, jolloin UV-säteily saapuu 45°:een kulmassa substraatille. Tällöin prosessi on hyvin nopea eikä vaadi mitään jälkikäsittelyä peilipinnan muodostamiseksi, jolloin integrointitiheys on paljon suurempi, mikä on hyvin tärkeää HDI-PCB-levyjen massavalmistuksessa. Mm. Teknillisen korkeakoulun Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa kyseisellä menetelmällä valmistettujen integroitujen peilien avulla pystytään kääntämään säteen kulkusuuntaa sekä kohti alustaa että pois päin siitä. /15/

1.6.3 Prismat ja hilat

Valosignaalin ohjausta valokanavan sisään ja ulos voidaan toteuttaa myös prismojen ja hilojen avulla. Kuvassa 13 on RIE-prosessin avulla polymeerivalokanavalle muodostettu mikrohilasysteemi. /12, 43/



Kuva 13. RIE-etsattu hilasysteemi. /12/

Hilojen ongelmana on muihin kytkentämenetelmiin nähden hyvin iso signaalin häviöosuus (polyimidikanavalle kytkentäteho on raportoitu olevan 35% kuoren ja ytimen taitekerroinero ollessa 0,03). Metalloiduissa peileissä se voi olla yli 90%. /37, 38/

2 Polymeerivalokanavat osana optoelektronista piirilevyä

Optiikan ja elektroniikan keskinäinen integrointi on keskeinen tekijä uusien piiriratkaisujen suunnittelun kaikissa vaiheissa. Valmistettaessa levyn optisen moduulin on aina pidettävä mielessä sähköisen moduulin integrointi ja toisinpäin kuvan 14 soittamalla tavalla, jossa optinen lohko on kiinteä osa sähköisiä digitaali- ja analogisia piiriä /44/. Kyseiseen teknologiaan pohjautuvien ratkaisujen arvioidaan tulevan massamarkkinoille tuotteiden muodossa 5-10 vuoden kuluttua /50, 51/.

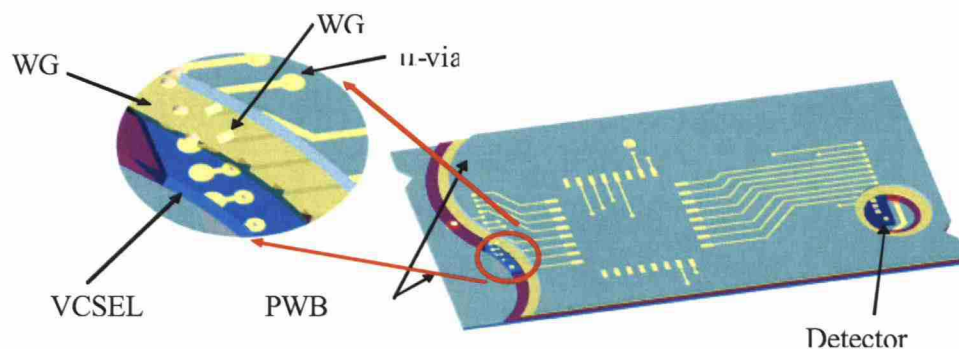


Kuva 14. Optisen ja sähköisten lohkojen mahdollinen sijainti. /44/

Tällä hetkellä optiikan integrointi elektroniikkaan voidaan toteuttaa integroituna ja passiivisena optoelektronisena piirilevynä. Optiikka-ala pysyy kuitenkin jatkuvan tutkimuksen ja kehityksen kohteena, joten toteutusratkaisut voivat olla hyvin erinäköiset /22/. Luvussa 2 prosessit pyritään tarkastelemaan passiivipolymeerivalokanavien näkökohdasta.

2.1 Integroitu optoelektroninen piirilevy

Integroidussa optoelektronisessa piirilevyssä (O/E-piirilevyssä) aktiiviset ja passiiviset optiset komponentit, kuten mm. valoa lähettävä laser, ilmaisimet ja valonkanavat on integroitu piirilevyyn sähköisten kerrosten väliin (kuva 15). /10, 46/

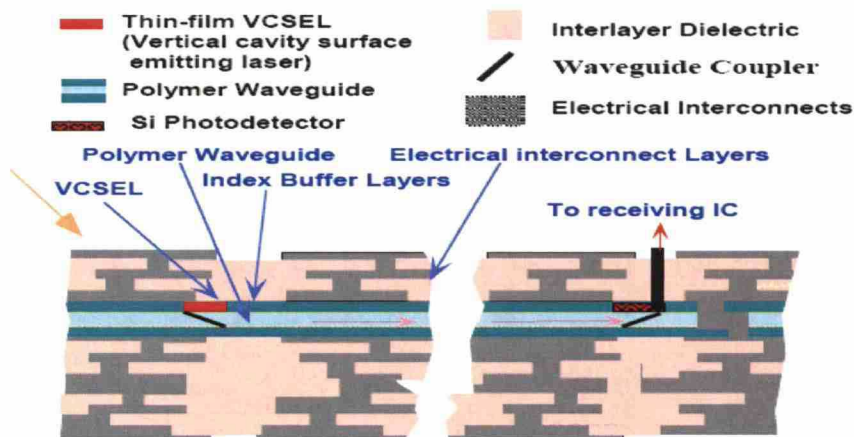


Kuva 15. Optisten komponenttien ja valokanavien integrointi sähköiseen piirilevyyn. /47/

Sisäkerrokseen johdin- ja kontaktialueet voidaan muodostaa litografisesti. Läpivientien tehtävänä on toimia sähköisenä kontaktina lähettimelle ja detektorille, ja siirtää signaalia kerrosten välillä. Metalloitujen mikropölyjen avulla valonsäteet ohjataan lähettimestä valokanaviin ja siitä eteenpäin kohti ilmaisinta. /47/

Sähköisten komponenttien ladonta voidaan suorittaa tavallisten liitosprosessien mukaisesti piirilevyn päälle /47/, jolloin erityistä huomiota on kiinnitettävä sähköisten komponenttien juottamisessa levyyn kohdistuviin termisiin rasituksiin. Markkinoiden tällä hetkellä parhaat VCSEL-komponentit kestävät jopa 325 °C lämpötilaa 10 sekuntia /48/, mutta yleisesti valokanavapolymeerien lasittumislämpötila $T_g < 200^\circ\text{C}$. /2, 22, 24/

Optiikkaa lisättään integrointivaiheen viimeisessä osassa laminoimalla sen kahden sähköisen kerroksen väliin (kuva 16). /12, 47/



Kuva 16. Optiikan kokonaisintegrointi /12/

Valoa lähettävänä komponenttina voidaan käyttää niin pinta- kuin päätyemittovakin laseria. Signaalin ulostuloteho riippuu mm. valokanavan ytimen vaimennuksista, passiivisten komponenttien kytkentätehohäviöstä, ilmaisimen herkkyydestä, vasteajasta ja datasiirtonopeuden vaatimuksista. /11, 12, 16, 39/

VCSEL:n tärkeimmiksi kriteereiksi on noussut hyvin matala kynnysvirran suuruus, lämpötilan ja -vaihtelun korkea sietokyky ($-55\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 125\text{ }^{\circ}\text{C}$). Menetelmän luonteesta johtuen lähettimen jäähdytys vaatii erikoisjärjestelyjä, koska VCSEL ja ilmaisimet ovat ympäröity polymeereillä, mikä johtaa korkean lämpötilagradientin muodostamiseen optisten komponenttien ympärillä suhteessa piirilevyn ympäristöön. Tilanteeseen saadaan helpotusta valitsemalla geometrisesti mahdollisimman ohuet komponentit ja jäähdytysratkaisulla, joissa metallinen läpivienti ja termosähköinen jäähdytinlevy ovat avainasemissa. Läpivienti voi johtaa toiminnassa muodostuvaa lämpöä suoran komponentista ja/tai termosähköisen jäähdytyslevyn pinnalta kohti piirilevyn ulkopintaa. Toisaalta lähettimen poikkileikkauspaksuutta voidaan pienentää

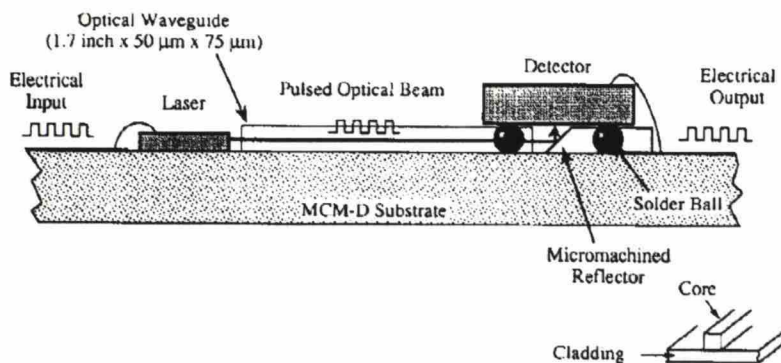
irrottamalla toiminnallisen rakenteen substraatista mekaanisesti kiillottamalla tai epitaksiaalisella irrotuksella. /16, 47/

2.2 Passiivinen optoelektroninen piirilevy

Tosin kuin integroidussa O/E-levyssä, jossa optiset komponentit on haudattu levyn sisäkerrokseen, passiivisessa O/E-ratkaisussa optoelektroniset komponentit liitetään piirilevyn pinnalle. Optiikan korkeiden kohdistustarkkuusvaatimusten vuoksi komponenttien ladonta joudutaan suorittamaan tarkkuusliitoslaitteiden avulla, mikä aiheuttaa lisävaiheita kokoonpanoprosessiin. Passiiviset optoelektroniset piirilevyrakenteet voidaan jakaa valokanavien valmistuksen perusteella kahteen ryhmään: valokanavat piirilevyn pinnalla ja sisällä. /22, 51, 52/

2.2.1 Valokanava pinnalla

Tässä ratkaisussa optiset ja sähköiset komponentit on sijoitettu samalle tasolle piirilevyllä kuvan 17 osoittamalla tavalla /52/.



Kuva 17. Optisten ja sähköisten komponenttien integrointi samalla tasolle. /52/

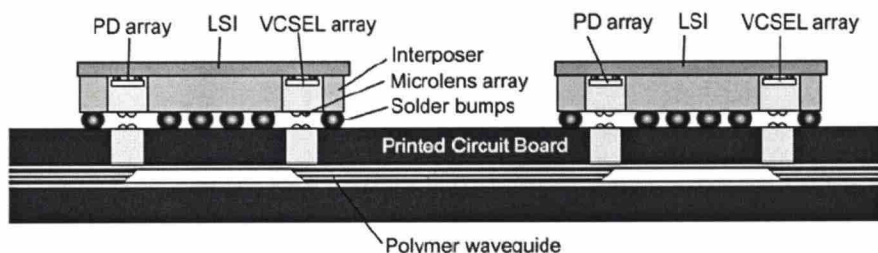
Valokanavan ylä- ja alakuoreen on muodostettu avaukset ilmaisinsirun juotospallojen kontaktointia varten. Ilmaisimen aktiivisen alueen ja peilin välisessä kohdistuksessa voidaan käyttää hyväksi reflow-prosessissa tapahtuvaa passiivista itsekohdistusta /52/, jossa juotteen pintajännitys ohjaa komponentin oikeaan kohtaan suhteessa juotosalueeseen /53/.

Polymeerivalokanavan sisään- ja ulostulorajapinnoilla tapahtuva signaalin kytkentä ja ohjaus voidaan toteuttaa suoralla ja epäsuoralla kytkentätavoilla. Edellisessä signaalin ohjaus valokanavaan tapahtuu ilman mikro-optisten komponenttien (peilien, linssien, hilojen jne.) käyttöä sijoittamalla ja kohdistamalla optisten komponenttien aktiiviset alueet kanavien päätyihin, silloin kun jälkimmäisen tapauksessa mikro-optisten ohjauskomponenttien käyttö on välttämätön. Ohjauskomponentit voivat aiheuttaa menetyksiä optiseen tehobudjettiin. Suorassa kytkentätavassa keilankäännöstä aiheutuvia häviöitä ei ole, jolloin kytkennän tehohäviöt pienenevät. Tällöin merkittävimmiä häviötekijöiksi voivat muodostua kanavan vaimennus ja sironta /10/. Kuvassa 17 valoa lähettävä laserkomponentti on suorassa kytkennässä valokanavaan detektorin ollessa epäsuorasti kytkettynä peilin avulla /52/.

Valoa lähettävä komponentti voidaan liittää tavanomaisella bondauksella aktiivipuoli kohdistettuna tarkasti kohti valokanavan ydintä, ja metallilangalla muodostetaan sähköinen kontakti ohjauspiiriin ja/tai muihin komponentteihin. VCSEL:n kohdistus ja liittäminen voidaan suorittaa niin manuaalisesti kuin itsekohdistuvasti /52, 54, 55/

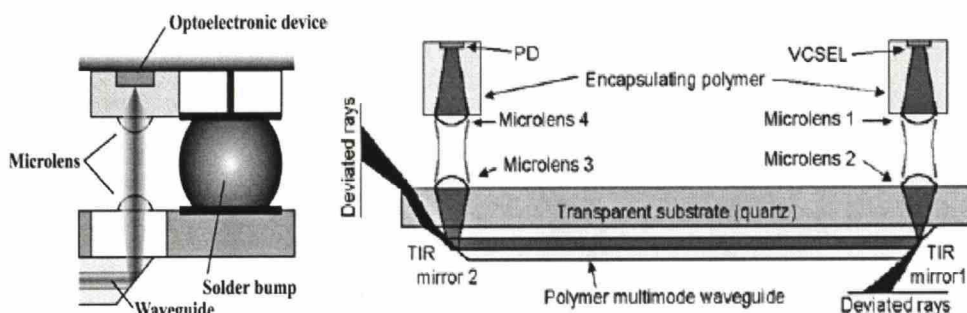
2.2.2 Valokanavat piirilevyn sisällä

Tässä ratkaisussa optiset ja sähköiset komponentit on liitetty substraatin pintaan valokanavan sijaitessa piirilevyn sisällä. Kuvassa 19 on Ishii *et. al.* kehittämä konsepti optisten moduulien integroimiseksi. /56/



Kuva 19. Optisen moduulin paketointi. /56/

Optisen BGA-modulin liittäminen voidaan suorittaa automaattista pintaladontalinjaa käyttäen valokanavat sisältävälle piirilevyille, mikä on massatuotannon kannalta välttämätöntä. Optisen signaalin ohjaus emitteriltä valokanavaan ja siitä ilmaisimelle on toteutettu mikrolinssien ja -peilin avulla (kuva 20). /56/

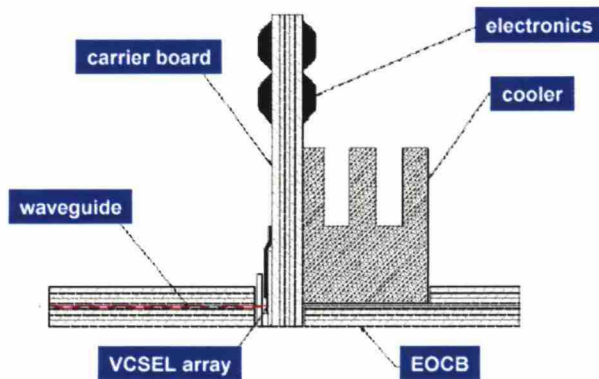


Kuva 20. Mikrolinssien ja -peilin muodostama ”OptoBump”-linkki. /56/

Lähetin- ja vastaanotinmoduulien kohdistustarkkuus suhteessa valokanavan peiliin on raportoitu olevan piirilevytason suunnassa $\pm 50 \mu\text{m}$. Demonstraattorilla on toteutettu 1,25 Gb/s:n nopea tiedonsiirtoväylä. /56/

Valosignaali voidaan ohjataan piirilevyn sisällä olevan kanavaan myös suoralla kytkennällä erillisen kantajasubstraatin avulla, jolloin optisten komponenttien integrointi suoritetaan O/E-piirilevyyn muodostetun avauksen avulla (kuva 21). Kantajasubstraatille voidaan liittää myös mm. optisten komponenttien ohjauspiirit.

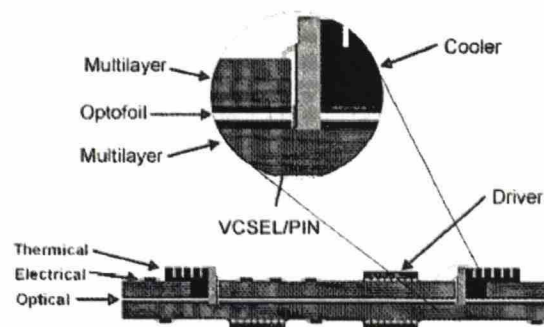
/57/



Kuva 21. Kantajasubstraatin avulla toteutettu integrointi. /57/

Tässä tapauksessa optiset komponentit voidaan sijoittaa pintaliitoskomponenttina ja/tai piirilevyyn sisään valokanavan välittömään läheisyyteen, mikä antaa paremmat lähtökohdat prosessin kaikissa suunnittelu- ja toteutusvaiheissa massatuotannon näkökulmasta. /9, 10/

Myös lämmönpoistohaasteet ovat ratkaistavissa suhteellisen helposti, jolloin jäähdytin voidaan liittää kantajan välittömään läheisyyteen (kuva 23). /9/



Kuva 23. Sähkö-optisen piirilevykonseptin toteutus optisen kantajan avulla. /9/

3 Optisten polymeerivalokanavien ja -kalvojen mittausmenetelmät

Massatuotannossa valokanavan toiminnallisuutta on pystyttävä luotettavasti varmistamaan ennen sähköisten ja optisten komponenttien ladontaa, jolloin erityisesti ainetta rikkomattomien menetelmien asema korostuu. Mitta-alueet ja -tarkkuus vaihtelevat paljon, joten yleispätevää menetelmää ei ole. Myös polymeerivalokanavan ominaisuudet asettavat ehtoja menetelmän valinnassa. Huomiota on kiinnitettävä lisäksi mittaustekniikan yhteensopivuuteen osaksi tuotantoprosessin olemassaolevaa laitekantaa mm. kustannusten pienentämiseksi. /9, 19, 57/

3.1 Sironneen valon mittausmenetelmä

Sironneen valon mittaus on luotettava ja laajasti käytetty ainetta rikkomaton menetelmä valokanavien optisten vaimennusarvojen mittauksissa /58, 59/, jonka pohjalta on kehitetty useita valokanavassa etenevän valosignaalin ominaisuuksia tutkivia evaluointimenetelmiä /58, 60/.

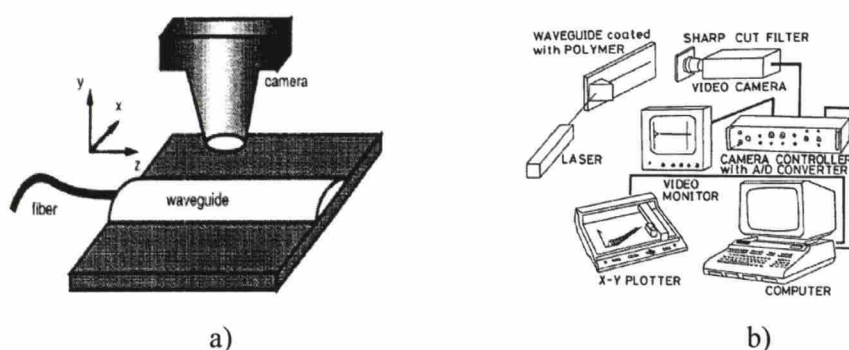
Sironen valon mittausmenetelmässä pystytään mittaamaan hyvin matalat optiset vaimennusarvot omaavat materiaalit 0,01 dB/cm:n asti /61/ mittaushaarukan yläarvon olevan jopa 10^2 dB/cm:n luokkaa /59/.

3.1.1 Menetelmän mittausperiaate ja -asetus

Menetelmässä anturi liikkuu mitattavan valokanavan yläpuolella rekisteröiden siinä etenevän signaalin sirontaa. Menetelmä perustuu oletukseen sironneen valomäärän olevan suhteuttavissa kanavassa etenevän signaalin intensiteettiin. Valosignaali johdetaan suoran kanavaan tarkoitukseen sopivaa laserlähteeseen kytkettyä lasikuitua

pitkin (kuva 24 a) /62/ tai prismakytkentää hyväksikäyttäen (kuva 24 b) /63/ riippuen mittauksen vaatimuksesta.

Mittausanturina voidaan käyttää mm. lasikuitua /58/ tai videokameraa /63/, jolloin edellisen tapauksessa joudutaan tarkan signaali/kohina-suhteen arvioimiseksi skannaamaan tutkittavan valokanavan koko leveydeltään. Poikittainen skannaus varmistaa kaikkien sironneiden säteiden suhteellisen täydellistä havaitsemista vaimennusarvojen määrittystä varten /58/.



Kuva 24. Signaalin ohjaaminen kanavaan kuidun avulla (a); sironneen valon menetelmän mittausasetus (b).

Jälkimmäisen tapauksessa videokamera kuvaa mitattavaa valokanavaa rekisteröiden samalla siitä sironneen valon intensiteettiä. Kamera voidaan liikutella signaalin etenemissuunnan mukaisesti eli kanavan pituussuunnassa, jolloin saadaan määritettyä suoran valokanavan vaimennusarvot pituusyksikköä kohden. /59, 63/ Mikäli kyseessä on suorasta valokanavasta poikkeava rakenne, kuten esimerkiksi haaroitin tai Mach-Zehnder-interferometri (M-Z-interferometri), poikittaisella kameraskannauksella saadaan tarkkailtua signaalin etenemistä optisen komponentissa ja määritettyä vaimennusarvot /60/.

3.1.2 Mittausmenetelmän edut ja rajoitukset

29

Toisaalta muihin mittausmenetelmiin nähden poikkeuksellisen laajaa vaimennusarvojen toteamishaarukkaa $0,01 - 10^2$ dB/cm /59, 61/ mahdollistaa melkein kaikkien optisten polymeerien evaluoinnin.

Mittausluotettavuuden kannalta anturipään on pysyttävä vakioetäisyydellä tarkasteltavaan rakenteeseen /58/, mikä asettaa vaatimukset tarkasteltavan polymeerivalokanavan paksuusvaihteluille. Toisaalta poikittaisen skannaustekniikan ansiosta valokanavaa ei tarvitse evaluoida kokonaan sillä oletuksella, että kanava on optisilta ominaisuuksiltaan homogeeninen koko pituudeltaan.

Kuitenkin suurin epävarmuustekijä liittyy kanavasta karanteen valon täydelliseen rekisteröimiseen varsinkin monimutkaisissa komponenteissa /58/, mikä vaikuttaa suoraan mitattavien arvojen suuruuteen. Vaikka kameran kalibrointi nousee ratkaisuasemaan mittaustulosten luotettavuuden ja vertailukelpoisuuden kannalta /59, 60, 63/, sillä toteutettu ratkaisu vaikutti luotettavammalta kuin kuidulla järjestetty.

Mittauksen aikana valokanavat eivät altistu kemialliselle, fysikaaliselle tai mekaaniselle rasitukselle, jolloin tarkasteltua rakennetta voidaan jatkoprosessoida tai käyttää sellaisenaan suunnitelmien mukaisesti olettaen, ettei ilmasta johtuvaa kontaminaatio aiheuta huomattavaa vahinkoa niin itse mittaustulokselle kuin prosessillekaan.

3.2 Katkaisumenetelmä

Katkaisumenetelmä on yksinkertainen ja luotettava keino määrittää polymeerivalokanavan optiset vaimennusarvot /58/, joka suoraviivaisuutensa ja tarkoitukseen soveltuvan yleisesti käytössä olevan laitteiston ansiosta on noussut hyvin suosituksi mittausmenetelmäksi /64/.

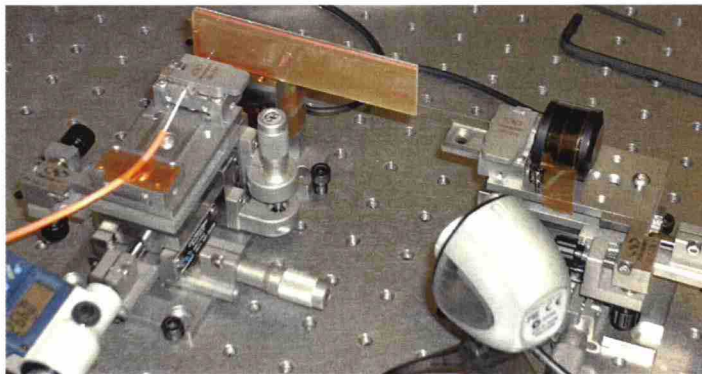
Katkaisumenetelmän pohjalta on kehitetty lukuisia optiikan integrointia tarkasteltavia menetelmiä, joiden avulla pystytään mm. määrittää valokanavien kytkentätehokkuutta /65/, mikä on elintärkeä optisen budjetin arvioinnissa sähköoptisen piirilevyn suunnittelussa ja valmistuksessa /12/.

3.2.1 Katkaisumenetelmän mittausperiaate ja -asetus

Menetelmä voidaan toteutusluonteensa perusteella jakaa suoraan ja täydelliseen katkaisumittaukseen /58/. Kummassakin tapauksessa valokanavan päätyihin asetetaan valonlähde- ja ilmaisineläitteistot /66/, jolloin valolähteenä toimivan laserin lähettämä signaali voidaan ohjata suorakytkennällä, optisesti passiivisten komponenttien /67/ ja/tai kuidun välityksellä valokanavaytimen päätyyn, jonka toisella puolella rekisteröidään ulostulevan signaalin teholumemat /58/.

Detektorin puolella voidaan käyttää niin ikään suorakytkennän lisäksi mm. valokuitua, jonka avulla valokanavan ytimeä tulevat fotonit ohjataan rekisteröitäviksi ilmaisimelle. /58, 64/

Kuvassa 26 on Elekroniikan valmistustekniikan laboratoriossa sijaitseva mm. optisen signaalin vaimennusta mittaava laitteisto, jolla on toteutettu polymeerivalokanavien ja integroitujen kokonaisheijastuspeilien evaluointi katkaisumenetelmällä.

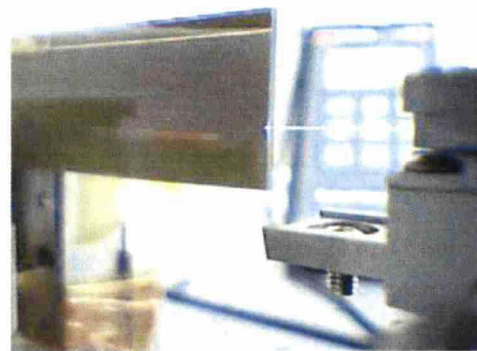


Kuva 26. Optisen piirilevyn mittaus katkaisumenetelmän avulla. /68/

Täydellisessä katkaisussa valokanavat lyhennetään tietyltä vakiopituudelta tarkoitukseen soveltuvilla menetelmillä, joista sahaus on käytetyin vaihtoehto /58/. Valokanavien päätyjen sileyttä voidaan parantaa kiillotuksella kytkentähäviöiden vähentämiseksi /69/, jolloin saadaan minimoitua mm. kanavaytimeen kytkeytyvän valosignaalin sirontaa kuvan 27 osoittamalla tavalla /68/.



a)



b)

Kuva 27. Valokanavan ja siihen integroidun peilikomponentin mittaussuunnitelman katkaisumenetelmällä ennen (a) ja jälkeen (b) valokanavapäädyt sileyden parantamista. /68/

Toisaalta lyhennettyjen näytteiden reunojen kiillotus ei ole pakollinen, jos käytetty katkaisumenetelmä tuottaa tarpeeksi hyvänlaatuisen jäljen, jolloin kytkentätappion täydelliseksi minimoimiseksi sahattujen kanavapäätyjen karheus ei saisi ylittää mitattavan signaalin aallonpituuden kymmenestä osaa, ts. 850 nm:n valosignaalin kohdalla reunan karheuden on oltava korkeintaan 85 nm /10/. Kyseisellä tavalla meneteltiin tässä diplomityössä määrittäessä suurtuotantomenetelmin valmistettujen passiivipolymeerivalokanavien optisia vaimennusarvoja työn kokeellisessa osuudessa. Sahausjäljen karheutta voidaan todeta mm. optisilla profilometreilla /70/.

Jokaisen lyhennyskerran jälkeen valolähde ja ilmaisin kohdistetaan vastaavasti valokanavan sisään- ja ulostuloon laitteiston sallimalla tarkkuudella ja suoritetaan mittaussuunnitelman detektoriin kytketyn säteilytehomittarin avulla. Näin toistettavan mittaussuunnitelman avulla muodostetaan kuvaaja, jonka suoran kulmakerroin on mitattavassa valokanavassa etenevän signaalin vaimennusarvo pituusyksikköä kohti

/58/. Tehomittarin ilmoittamat lukemat voidaan muuntaa vaimennusarvoiksi seuraavan yhtälön 1 avulla /11/:

$$\alpha = 10 \times \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right), \quad (1)$$

jossa P_{in} ja P_{out} ovat kanavan sisään- ja ulostuloteholukema.

Suorassa katkaisumenetelmässä kyse on täysin samoista asioista ja toteutumiskäytännöistä kuin täydellisessä katkaisussakin, jolloin menetelmien välinen ero liittyy lyhennysten ja mitattavien näytteiden lukumäärään. Suorassa katkaisussa tutkittavan valokanavien pituus pyritään säilyttämään muuttumattomana, jolloin ainoastaan niiden päädyt saatetaan mittauskuntoon kokonaispituuden minimaalisella muutoksella, ja mittaus suoritetaan niin monelle näytteelle kuin mahdollista, mikä sallii luopumista kytkentämenetysten arvioinnista. Täydellisessä katkaisumenetelmässä kanavalevyt lyhennetään useaan otteeseen vakiopituudelta tilastollisesti pätevän mittapisteiden määrän saamiseksi, jolloin kytkentätehon luotettava arviointi on mahdollinen, ja mitattavien kanavanäytteiden lukumäärä saa olla huomattavasti pienempi kuin suorassa katkaisumenetelmässä. /58/

3.2.2 Menetelmän edut ja rajoitukset

Menetelmä on osoittautunut erittäin tarkaksi ja luotettavaksi arvioitaessa polymeerivalokanavien optisia vaimennusarvoja. Täydellisen katkaisumenetelmän avulla saadaan tarkasti määritettyä kytkentätehojen lisäksi optisen piirilevyn valmistusprosesseista kanaviin aiheuttamien defektien vaikutukset suorituskyykyyn kanavapituuden funktiona, joista merkittävimpiä valmistusmenetelmästä riippuen ovat mm. ilmataskut ja -sulkeumat, epäpuhtauksien absorbointi ytimeen, ala- ja/tai yläeristeen karheuden vaikutus ja silloitusasteen epähomogeenisuus /9, 58/, mikäli niiden kaikkien olemassaoloa ja sijaintia kyetään toteamaan, mikä on erittäin helppoa ainakin ilmataskujen kohdalla.

Menetelmän suurin rajoitus on luonnollisesti näytteen destruktiivisuus, mutta täydellistä katkaisua ei tarvitse välttämättä aina suorittaa, vaan suorakatkaisu voi tulla kyseeseen, kunhan ensin selvitetään kaikki ym. tarpeelliset asiat täydellisen katkaisumenetelmän avulla. /58/

Toisaalta hyvin korkeiden vaimennusarvojen omaavien polymeerien evaluointi kyseisellä menetelmällä tuottaa vaikeuksia erityisesti pitkien kanavien kohdalla, jolloin kanavassa etenevää signaalia ei kyetä detektoimaan ilmaisimen puolella sen liiallisen vaimentumisen takia. Lisäksi mitattava levy altistuu mekaaniselle rasitukselle lyhennyksen yhteydessä, mikä saattaa johtaa mittauksen toistettavuusongelmaan. /58, 65, 69/

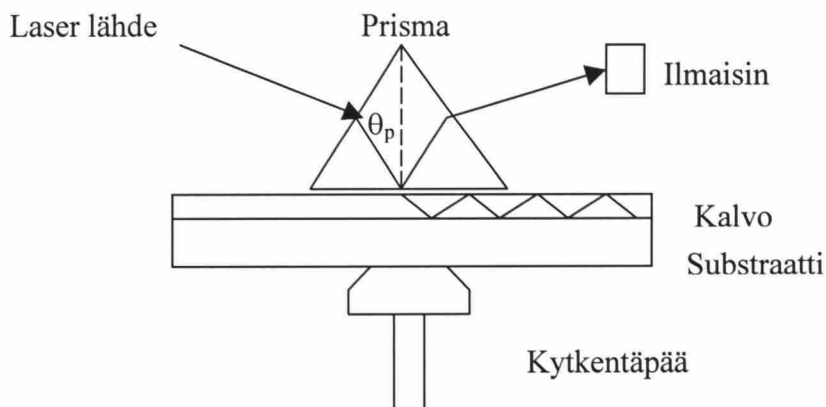
3.3 Prismakytkenä

Prismakytkenä hyvin laajasti käytetty menetelmä optisten kalvojen taitekertoimien ja paksuuksien määrittämiseen /71/, joka on saavuttanut hyvin vankan aseman integroidun optiikan tutkimuksessa /58/ niin epäorgaanisten materiaalien /72/ kuin orgaanistenkin polymeerivalojohtimien mittauksissa /73/.

Prismakytkenän avulla pystytään mittaamaan erittäin nopeasti ja luotettavasti ennältä tuntemattomienkin materiaalien optiset ominaisuudet jopa 0,3%:n tarkkuudella paksuuden ja 0,1%:n tarkkuudella taitekertoimen arvot mittausajan ollessa 20 sek:n luokkaa /74, 75/.

3.3.1 Prismakytkenmän mittausperiaate ja –asetus

Menetelmässä laserin lähettämä signaali ohjataan prisman avulla mitattavaan optiseen kalvoon /66/ kuvan 28 osoittamalla tavalla.



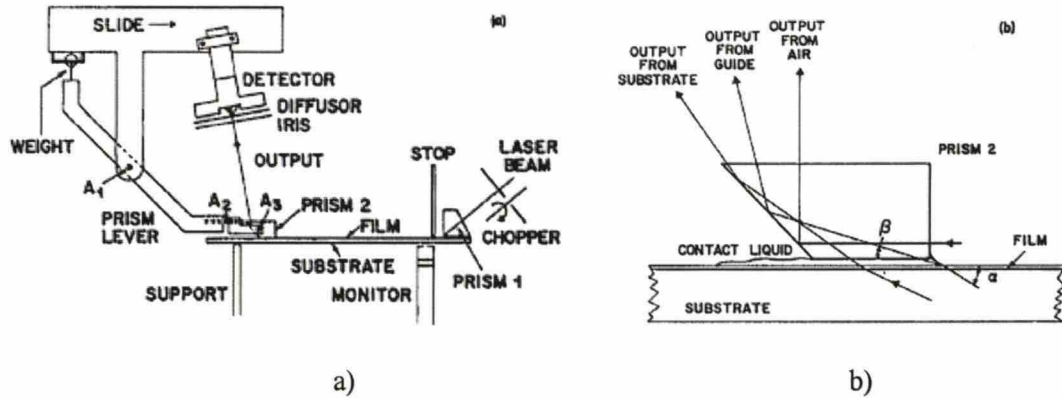
Kuva 28. Prismakytkenmämittauksen perusperiaate.

Prismassa laserlähteen lähettämä signaali läpikäy kokonaisheijastumisen kulman θ_p mukaisesti kuvan 1.3.1.1. osoittamalla tavalla. Tuleva ja heijastunut aalto muodostavat z-suuntaan kulkevan aallon etenemiskertoimen ollessa $\beta_p = n_p k_0 \sin\theta_p$, jossa n_p on prisman taitekerroin ja k_0 on vapaan tilan etenemisvakio. Poikittaissuuntainen kenttäjakautuma etenee prisman ulkopuolelle ja hajoaa eksponentiaalisesti prisman ja kalvon välissä. Kyseisen välin ollessa tarpeeksi pieni aalto etenee mitattavaan kalvoon etenemisvakioilla $\beta_p = \beta_m$, jossa β_m on kalvossa etenevän aallon etenemiskerroin. /66/

Useamman saman substraatin toistomittausten suorittaminen edellyttää tarkasteltavan näytteen tasaisuutta ts. prisman on pysyttävä halutulla vakioetäisyydellä mitattavasta kalvosta, jotta signaalin teho pysyisi niin ikään vakiona /58/. Joskus on välttämätöntä puristaa prisman kalvoa vasten mittauksen suorittamiseksi, mikä luonnollisesti johtaa menetelmän kontaktittomuusperiaatteen menetykseen /76/.

Ulostulevat säteet voidaan ohjata ilmaisimelle myös toisen prisman avulla. Kyseinen ulostuloprisma liikkuu mitattavan kalvon pinnalla kohti kytkenmäprismaa tietyllä

nopeudella, jolloin ulostuloprisman yläpuolella oleva prisman liikettä seuraava detektori rekisteröi kalvossa etenevän signaalin intensiteettiä suhteessa ulostuloprisman sijaintiin kalvon pinnalla. Kuva 29 esittää liikkuvaan ulostuloprismaan perustuvan menetelmän mittausasetuksen. /77/



Kuva 29. Kahden prisman mittausasetus (a); ulostuloprisman sujuvan ja kalvoa vahingoittumattoman liikkuvuuden edellytyksenä on optinen neste (b).

Ulostuloprisman liikkuvuus mitattavan kalvon pinnalla saadaan optisen nesteen avulla, jonka taitekerroin on yhtä suuri tai pienempi kuin prismalla. Mittauksessa käytetyn nesteen taitekertoimen ollessa suurempi johtaa siihen, että neste itse muuttuu valokanavaksi, jolloin kalvon optisten arvojen mittaus muuttuu lähes mahdottomaksi. /77/

Kontaktinesteen kostumattomuus kalvoon on elintärkeä, sillä mittauksen onnistumiseksi sen ja kalvon välisen kulman α on oltava suurempi kuin prismaan kytkeytyvien mitattavasta kalvosta etenevien säteiden kulma β kuvan 29 osoittamalla tavalla, jolloin ilmaisineläitteisto pystyy erottamaan ne ilmasta ja mahdollisesti substraatista saapuvista säteistä. /77/

3.3.2 Menetelmän edut ja rajoitukset

Prismakytkeä on periaatteessa ainetta rikkomaton menetelmä, joka mahdollistaa polymeerikalvojen tarkkaan paksuuden ja optisten arvojen mittauksen. Menetelmän avulla on mahdollistaa hyvin korkeat vaimennusarvot (80 dB/cm) omaavien kalvojen mittauksen luotettavuuden pysyessä 5-10%:n luokassa /76/. Toisaalta taitekertoimen määrittäminen tarkasteltavan menetelmän avulla on suhteessa muihin tässä työssä esitettyihin optisten polymeerikalvojen mittaamenetelmiin nähden parhaimpien joukossa tarkkuuden ollessa 0,01 /75/.

Mitattavan polymeerikalvon tasaisuus on tärkeä edellytys mittaukselle mittaamenetelmän luonteesta johtuen /58/, mutta toisaalta näytteen mitattava alue saa olla suhteellisen pieni vain 25 mm /75/, jolloin hyvin tasaisen kalvon valmistaminen tavanomaisin levitystekniikoiden avulla ei tuota kovin suurta ongelmaa.

Suuremmaksi haasteeksi voi erityisesti hyvin matalan taitekertoimen omaavan optisen polymeerin tapauksessa nousta sopivan substraatin löytyminen, jonka taitekertoimen on oltava pienempi kuin mitattavalla polymeerillä. Muussa tapauksessa substraatti itse voi muuttua valonjohtimeksi tarkasteltavan polymeerin ja ilmarajapinnan toimiessa kuoreina.

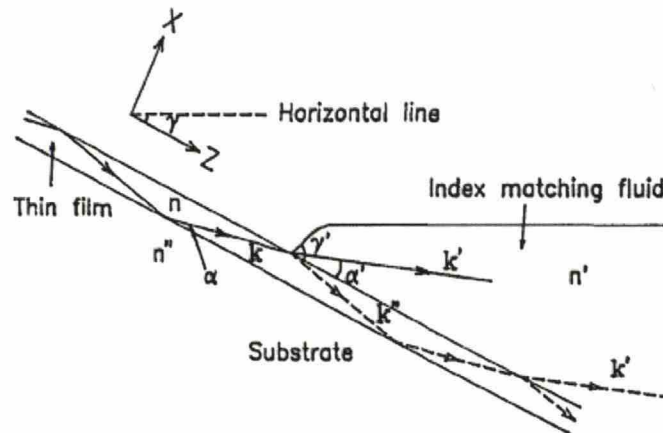
Liikkuvan prismamenetelmän tapauksessa kontaktinesteen on oltava fysikaalis-kemiallisesti täysin inerttiä maitattavaan kalvoon /77/. Toisaalta tarkoitukseen soveltuvia optisia sovitusnesteitä ja geelejä löytyy hyvin paljon tarkasti räätälöidyillä taitekerroin-, vaimennus- ja viskositeettiarvoilla /78/.

3.4 Tunnettuun liuokseen perustuva upotusmenetelmä

Menetelmä on suhteellisen yksinkertainen ja soveltuu erityisen hyvin optisesti passiivipolymeerivalokanavien – ja kalvojen vaimennusarvojen mittaamiseen, jonka vahvimpiin puoliin kuuluu ennen kaikkea ainetta rikkomattomuus ja tarkkuus, joka on tyypillisesti 5%:n luokkaa jopa hyvin matalia vaimennusarvoja (alle 0,1 dB/cm) omaavien polymeerien mittauksessa. /79/

3.4.1 Upotusmenetelmän mittauseriaate

Kuvassa 30 esitetty tilanne, jossa kuvataan valosignaalin etenemistä mitattavassa polymeerikalvossa, joka upotettiin optisesti tunnettuun liuokseen. /79/



Kuva 30. Valon eteneminen polymeerikalvossa optisessa upotusmittauksessa. /79/

Substraatti, jonka päälle mm. spinnaamalla levitetty kalvo on tietyssä γ -kulmassa upotettu nesteeseen, jonka taitekerroin n' on hiukan korkeampi kuin tutkittavan kalvon taitekerroin n , johon johdetun valosäteen etenemistä voidaan tarkastella tasoaaltona vektorin k avulla, joka läpikäy lukuisen määrän heijastumia polymeerikalvon sisällä. Tasoaaltovektori k muodostaa kulman α kalvon kanssa, jonka suuruus riippuu kalvon ja substraatin taitekertoimista n ja n'' , säteen aallonpituudesta, kalvon paksuudesta ja siinä etenevän aallon TE- ja TM-moodien ominaisuuksista. /79, 80/

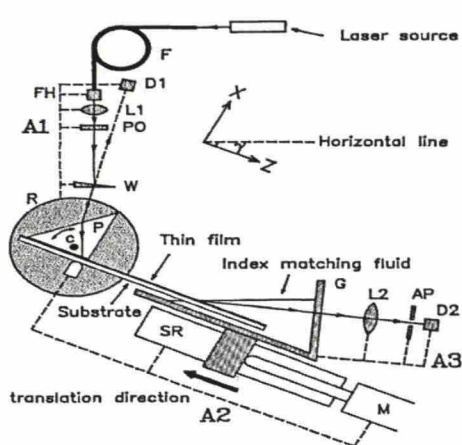
Upotusnesteen taitekertoimen n' ollessa suurempi kuin filmin n , osa tasoaallosta etenee kalvosta nesteeseen kuvan 1.5.1 vektorin k' mukaisesti muodostaen kulman α' Snellin lain mukaisesti, joka tässä tapauksessa muotoa

$$n \times \cos \alpha = n' \times \cos \alpha'$$

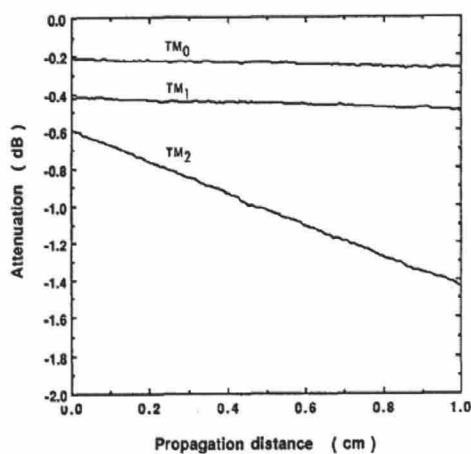
Pieni määrä tasoaaltoa heijastuu kuitenkin takaisin kalvo/neste-rajapinnalta takaisin vektorin k'' mukaisesti jne. kuvan 1.5.1 osoittamalla tavalla, jolloin 100% polymeeristä nesteeseen edenneestä aallosta on samassa suuntautumiskulmassa. Näin upottamalla substraatin nesteeseen tunnetun Z-suunnan mukaisesti saadaan mitattua kalvoon johdetun valosignaalin intensiteetin etenemismatkan funktiona. /79/

3.4.2 Upotusmittauksen asetukset

Kuvassa 31 a on skemaattinen esitys upotusmittauksen asetuksesta, jonka avulla saatiin mitattua optisten valokanavien valmistuksessa usein käytetyn polymetyylimetakrylaatin (PMMA) eri moodien vaimennusarvoja etenemismatkan funktiona (kuva 31 b). /79/



a)



b)

Kuva 31. Upotusmittauksen laitteisto (a) ja PMMA:n optiset vaimennusarvot (b).

Kuvassa 31 a viritettävän laserin lähettämä signaali ohjataan valokuidun F kautta kollimointilinssille L1, jolloin sen tehoa tarkkaillaan fotodiodin D1 avulla. Prismalla P avulla signaali kytkeytyy polymeerikalvoon, joka upotetaan tietyn taitekertoimen omaavaa nestettä sisältävän lasiastian G halutussa kulmassa γ , jolloin liuokseen kulmassa α' edenneet säteet kulkevat lasiastian G seinämän lävitse kollimointilinssille L2, jonka jälkeen ne rekisteröidään diodilla D2. /79/

Rekisteröintimoduuli A3 liikutellaan suhteessa mitattavan levyn sisältävän moduuliin A2 (yleensä 0,5 cm/min). Ehtona mittauksen onnistumiselle upotusliuoksen ja kalvon välisen kontaktikulma γ' on oltava suurempi kuin nesteeseen edenneiden säteiden kulma α' , jolloin vältetään heijastumilta ilman ja upotusliuoksen rajapinnasta. Kontaktikulman γ' suuruuteen vaikuttavat mitattavan polymeerikalvon ja upotusliuoksen pintaenergiat. Mikäli γ' on liian pieni kalvo voidaan käsitellä sopivan pintajännityksen omaavilla aineilla, kuten polysiloksaanilla, haluttujen pintaenergioiden saamiseksi. /79/

Kuvassa 1.5.2.1 b) esitetty upotusmittauksella määritetyt PMMA:n vaimennusarvot. PMMA-kalvo (paksuus 4,6 μm) levitettiin spinnaamalla piikiekolle. Laserlähteen tuottama signaali oli 0,38 μm , upotusliuoksen taitekerroin $n' = 1,52$, upotusnopeudella 0,5 cm/min. TM_0 -, TM_1 - ja TM_2 -moodien vaimennusarvot saatiin pienemmän neliösumman menetelmän avulla. /79/

3.4.3 Menetelmän edut ja rajoitukset

Kyseitä menetelmän avulla voidaan mitata jopa 10 dB/cm suuruiset vaimennusarvot toistettavuusvirheen ollessa 5%. Kuitenkin mitattavien kalvojen pintalaatu on suurin virhetekijä, johon kuuluvat niin pintaenergian epähomogeenisuus kuin karheus, jolloin mittauksen toistettavuusvirhe voi kasvaa 10%:iin. Toinen mahdollinen

virhelähde on substraatin upotus- ja rekisteröintimoduulin siirtymisnopeuksien synkronisointi.

Saatavilla olevien kaupallisten upotusliuosten ovat 1,3-2,1 taitekerroinhaarukassa, jolloin monet optisissa sovelluksissa käytetyt polymeerit voidaan tutkia ko. menetelmällä /79/.

Lisäksi upotusnesteet eivät yleensä kuulu liottimiin, jolloin myös hyvin matalan kemiallisen kestävyysominaisuuden omaavat polymeerit voidaan määrittää tällä menetelmällä. Itse asiassa tähän seikkaan upotusmenetelmän koko ainetta rikkomattomuus-periaate perustuukin. /79/

4 Työn tarkoitus

Diplomityö on osa TEKESin ja elektroniikkateollisuuden rahoittamaa ”OHIDA-Optics on Future Printed Circuit Boards in High Speed Data Applications”- projektia, jossa tutkitaan ja kehitetään materiaali- ja valmistustekniikoita optisten siirtolinjojen integroimiseksi uudentyyppiselle optoelektroniselle piirilevyille.

Diplomityön tarkoituksena on kehittää pohjaa optisia valokanavia sisältävien piirilevyjen massatuotantovalmistukselle jatkoksi projektissa aikaisemmin kehitetylle mikrolitografiaa hyödyntävälle valmistusprosessille. Työssä tutkitaan sähköisten piirilevyjen tuotannossa hyödynnetyn infrastruktuurin soveltuvuutta optisten valokanavapiirilevyjen massavalmistukseen suurpinta-alapaneelivalottimen osalta. Lisäksi tarkastellaan optisten piirilevyjen valmistuksen eri osavaiheiden kriittiset prosessiparametrit.

5 Kokeellinen osa

Tässä diplomityössä optisten valokanavien valmistuksessa käytettiin samaan epoksiperheeseen kuuluvat märkälevitettävät ja valokuvioituvat polymeerit, jolloin niiden ominaisuudet, kuten lämpölaajenemiskertoimet, viskositeetti ja lasittumislämpötila olivat hyvin lähellä toisiaan. Näin ollen samanlaiset valolitografiset prosessointiolosuhteet olivat mahdollisia.

Valokanavat muodostettiin litografisella ytimen suorakuviointitekniikalla. Massatuotantoympäristön laitteistolla valmistetut valokanavapiirilevyt on vertailtu referenssinäytteisiin, jotka tehtiin mikropiirien tuotannossa käytetyillä laitteilla.

Valmistettuja valokanavien rakennetta tutkittiin mm. optisella- ja pyyhkäisyelektronimikroskopialla ja niiden toimivuutta katkaisumenetelmän avulla.

5.1 Työssä käytetyt materiaalit, kemikaalit ja laitteisto

Valokanavapiirilevyjen alustana käytettiin koesarjojen K1R1, K2L1 ja K2OL2 tapauksessa yksipuolista pinta-alaltaan 12 cm x 12 cm 1,0 mm paksua IGAV FR160A piirilevyä, jonka keskeisimmät ominaisuudet esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Alustana käytetyn IGAV FR160A laminaatin keskeiset ominaisuudet.

Ominaisuus	Yksikkö	IGAV FR160A
Paksuus	mm	1 ($\pm 25 \mu\text{m}$)
CTE, lasikuitusuunta	ppm/ $^{\circ}\text{C}$	15
Lasittumislämpötila Tg	$^{\circ}\text{C}$	160 ± 5

Koesarjassa K1R2 käytettiin Okmetic Oy:n valmistamat 4” piikiekot, joiden tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Alustana käytettyjen 4:n tuuman piikiekkojen ominaisuudet.

Ominaisuus	Yksikkö	Piikiekko
Paksuus	µm	525
CTE	ppm/°C	2,6x10 ⁻⁶
Sulamislämpötila T _m	°C	1414

Valokanavien kuorena ja ytimenä käytettiin Micro Resist Technologyn valmistamia negatiivisesti valokuvioituvia mr-L-6100XP- ja NanoTM SU-8-50-polymeerejä, vastaavasti.

mr-L-6100XP on modifioitu versio SU-8-50-polymeeristä. Käyttämällä samaan epoksiperheeseen kuuluvia resistejä minimoitiin materiaalien ominaisuuksien yhteensopimattomuudesta johtuvat ongelmatilanteet. Kuorimateriaalille mitattiin taitekerroin aallonpituuksilla 633 ja 850 nm, jolloin täysin silloittuneiden kalvojen taitekertoimien arvoksi saatiin 1,584 ja 1,569 vastaavasti. Ydinmateriaalilla vastaavat arvot olivat 1,596 ja 1,587. Taulukossa 4 on esitetty resistien tärkeimmät ominaisuudet.

Taulukko 4. Valokanavamateriaalien tärkeimmät ominaisuudet.

Ominaisuus	Yksikkö	SU-8 50 TM	mr-L 6100XP
Taitekerroin	(830 nm:llä)	1,587	1,569
CTE	(ppm / K)	52	>52
T _g	(100% silloittumisaste, °C)	200	210
Viskositeetti	(mPa s, T = 25°C)	15000	17000
UV-herkkyysalue (nm)		300-400	300-400

Polymeerien levitys suoritettiin testisarjojen K1R1 ja K1R2 osalta Teknillisen Korkeakoulun Micronova puhdistilassa (puhtausluokka 10). Muut koesarjat prosessoitiin Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa (puhdistilaluokka 100).

Prosessoitavat FR-4-levyt puhdistettiin asetonilla, isopropanolilla ja DI-vedellä ennen polymeerikalvojen levitystä. Levyt kuivattiin typpisuihkulla ja 120 °C Heraus UT6 kiertoilmauunissa 20 min ennen resistin levitystä. Uunin lämpötilan nousunopeudeksi mitattiin 3°C/min Levitys suoritettiin Suss Microtec:n valmistamalla Delta 20 BM spinnauslaitteella, jossa märkä resisti levitetään keskipakovoiman avulla (kuva 32).



Kuva 32. Spinnauslaite märkäkalvon levitystä varten.

Piirilevyjen paistoissa käytettiin myös ATV Technology HT-302D kuumalevyä, jonka lämpötilan nousunopeus oli 8°C/min.

Kehitys suoritettiin MicroChemin XP SU-8TM -kehitteessä polystyreeniastiassa Virax:n VXR-ravistimen päällä.

Valotuksessa käytettiin OHIDA-projektia varten suunniteltua 12 x 12 cm kokoista lasimaskia, jossa on mm. 10 cm pitkiä valokanavakuviota kanavavälillä 250 µm, x-risteymiä ja haaroittimia. Toinen käytössä ollut lasimaski, Asperation Oy:n suunnittelema maski, sisälsi mm. 10 cm pitkiä valokanavia kanavavälillä 1 mm.

Työssä käytettiin myös kalvomaskia, jonka kuviot olivat samanlaisia Asperation Oy:n suunnitteleman lasimaskin kanssa. Kalvomaski tehtiin Elektroniikan valmistustekniikan laboratorion laitteistolla. Maskin kalvona toimi AGFA:n valmistama Vivaldi VGB7-2 High Resolution filmi, jonka kuvioimiseksi käytettiin Mivatec GmbH:n MIVA High Definition Raster Xenon Photoplotter kuviointilaitetta

ja kehittämiseen automaattista AGFA Agfaline C Film Processor kehityskonetta. Fotoplotterin resoluutiokyky on $12,5 \pm 6 \mu\text{m}$.

5.1.1 Valokanavapiirilevyjen valmistuksessa käytetty valotuslaitteisto

Sarjojen K1R1 ja K1R2 resistien valotuksessa käytettiin Teknillisen korkeakoulun puhdastila Micronovassa oleva Mask Aligner Electronic Vision AL6-2 valotinta, jota käytetään puoliatomaattiseen maskinkohdistukseen mikropiirien valmistuksessa (kuvassa 33).



Kuva 33. ELVIS-valottimen kuva.

Koesarjan K2OL1 ja K2OL2 valokanavapiirilevyjen prosessoinnissa käytettiin OLEC Inc:n valmistama AT30-paneelivalotinta, jonka ominaisuuksia ovat suuri valotettava alue $610 \times 762 \text{ mm}$, pistemäinen kollimoimaton valonlähde, kaksi 8 kW :n elohopealamppua, kaksipuolinen valotusmahdollisuus, automaattinen ja manuaalinen kohdistus. Automaattisen kohdistuksen tarkkuus on $\pm 5 \mu\text{m}$, valotettavan piirilevyn paksuudelle ei ole ylärajaa manuaalisella kohdistusvalotuksella.

Kuvassa 34 on esitetty massatuotantopaneelivalotin.



Kuva 34. Massatuotantopaneelivalotin.

Mikropiirivalotuksessa valotusalueelle ($120 \times 120 \text{ mm}^2$), saapuvan UV-säteilyn tehon ja intensiteetin arvot olivat $0,3501 \text{ mW/cm}^2$ ja $7,0 \text{ mJ/cm}^2/\text{sek}$. Suurtuotantopaneelivalotuksen aktiivisen alueen ($610 \times 762 \text{ mm}^2$) keskikohtaan saapuvan säteilyn tehon ja intensiteetin arvoiksi ohjelmoitiin samat lukemat vertailukelpoisuuden aikaansaamiseksi. Arvot varmistettiin AccuMeter UV-säteilymittarin avulla, jolloin varsinaiseksi tehon ja energian keksikarvoiksi mitattiin $0,3475 \text{ mW/cm}^2$ ja $6,825 \text{ mJ/cm}^2/\text{sek}$.

Taulukossa 5 on työssä käytettyjen mikropiiri- (ELVIS) ja massatuotantovalotinyksiköiden (OLEC) vertailu.

Taulukko 5. Valottimien ominaisuuksien vertailu.

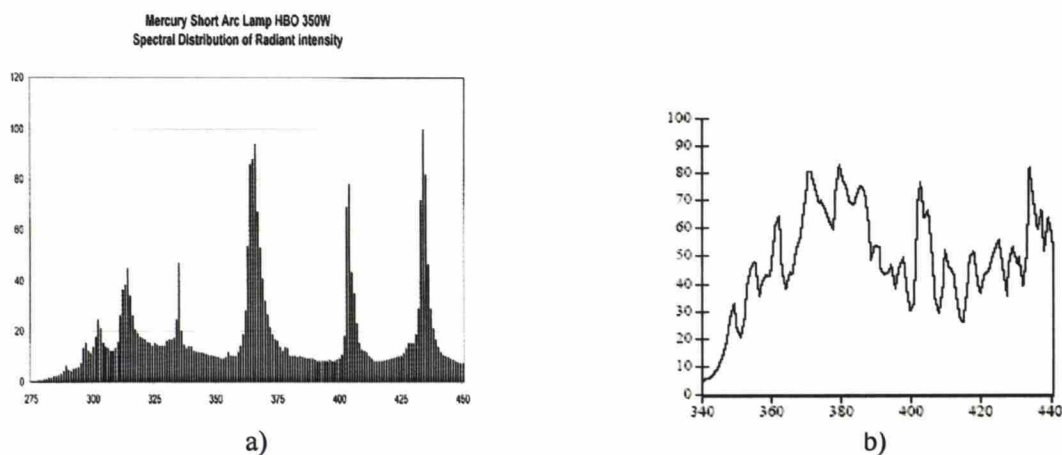
Ominaisuus	Yksikkö	ELVIS	OLEC
Aktiivinen valotusalue	(mm)	120 x 120	610 x 762
Lampun nominaalinen teho	(kW)	0,5	8,0
Lampun keskim. teho valotusalueella	(mW/cm^2)	0,3501	0,3475*
Lampun keskim. intensiteetti	($\text{mJ/cm}^2/\text{sek}$)	7,000	6,825*
Valolähteen tyyppi		kollimoitu	kollimoimaton
Lampun spektrin optinen kaista	(nm)	350 – 400	340 – 440

* = valotusalueen geometrinen keskikohta

Kollimoimattomuus paneelivalottimessa ilmeni pistemäisen valolähteen lähettämän UV-säteilyn intensiteetin ja tehon pienentymisenä siirtyessä tarjottimen keskikohdasta kohti reunoja, jolloin aktiivisen valotusalueen reunoilla ja kulmissa mitattiin AccuMeter UV-mittarilla keskimäärin 10 ja 12 %:n lasku suhteessa keskikohtaan, vastaavasti. Lisäksi valolähteen säteiden tulokulma OLEC-suurtuotantovalotimessa oli tarjottimen reunojen keskikohdissa $66,2^\circ$ ja kulmissa $60,5^\circ$, kun keskikohdassa eli aivan lampun alapuolella se oli 90° . Nämä puuttuvat peili- ja linssisysteemin avulla kollimoidussa mikropiirivalottimessa.

Toinen mikropiiri- ja suurpinta-ala paneelivalottimien välinen ero liittyy lamppujen tuottamaan valospektriin. IC-valottimille on ominaista kapea spektrinen ulostulo, jossa on suurtehoiset terävät piikit optimoituna tietyllä aallonpituudelle. Aallonpituus riippuu valotettavan polymeerin vaatimasta säteilyn aallonpituudesta, jonka resisti absorboi käynnistyäkseen jälkipaiston aikana kemiallisen ristiinsilloittumisreaktion.

Työssä valokanavien ydinmateriaalina käytetyn SU-8 50TM-polymeerille optimaalisin aallonpituus sijaitsee lähiultraviolettialueen 365 nm:n kohdalla. Kollimoimattoman suurpinta-ala valotuslaitteiston tapauksessa lamppu tuottaa laajakaistaspektriä suurella teholla. Kuvassa 35 esitetty työssä käytettyjen mikropiiri- (ELVIS) ja paneelivalottimien (OLEC) lamppujen tuottamat spektrit.



Kuva 35. IC- (a) ja suuripinta-ala valottimen (b) lamppujen spektrit.

5.2 Valokanavapiirilevyjen vertailukriteerit ja -menetelmät

Polymeerivalokanavat vertailtiin valokanavan geometrian, sivuseinämien tasaisuuden ja optisen vaimennuksen perusteella. Valokanavien geometrysten muotojen ja erityisesti kanavapäädyn profiilin tarkastelun avulla määriteltiin myös kollimoidun ja kollimoimattoman valolähteiden erot.

Sivuseinämien karheus lisää sirontahäviöitä, joten sen evaluointi on tärkeää valokanavien karakterisoinnissa. Työssä valmistettujen pituudeltaan 10 cm:n kanavien kohdalla sivuseinämän laatu nousi tärkeämmäksi tekijäksi kuin esimerkiksi valmistusmateriaalin absorptiosta johtuvat optisen tehon menetykset.

Toiminnallisen optisen piirilevyn valmistus edellyttää mikro-optisten ja aktiivisten komponenttien kytkemistä valokanavaan, ja riittävän kytkentätehon aikaansaamiseksi kanavan profiilin geometrysten mittasuhteiden ja muodon on pysyttävä ennalta arvioitujen ja mallinnettujen rajojen sisällä.

Kaikkien näytesarjojen profiilit ja sivuseinämät tutkittiin ja vertailtiin elektronipyyhkäisymikroskopian avulla, jonka 1,5 nm:n erottumiskyky mahdollisti kyseisten tekijöiden luotettavan tarkastelun. Elektroniikan valmistustekniikan laboratorion pyyhkäisy elektronimikroskooppi JEOL JSM-6335F:n suurennuskyky suuremmillaan on 500000-kertainen. SEM:n avulla määriteltiin myös suurtuotantolaitteiston soveltuvuutta optisten piirilevyjen valmistukseen ym. kriteerien osalta.

SEM:n huono puoli on värien erottumiskyvyn puuttumisessa, jolloin sillä otetuissa kuvissa ei nähdä valokanavan kuorten ja ytimen välisiä rajapintoja, koska polymeerimateriaalien taitekerroin-arvot, kuten muutkin optiset ja fysikaalis-kemialliset ominaisuudet, ovat hyvin lähellä toisiaan OHIDA projektin vaatimusten

mukaisesti. Toisena rakennekarakterisointimenetelmänä käytettiin optista mikroskopiaa.

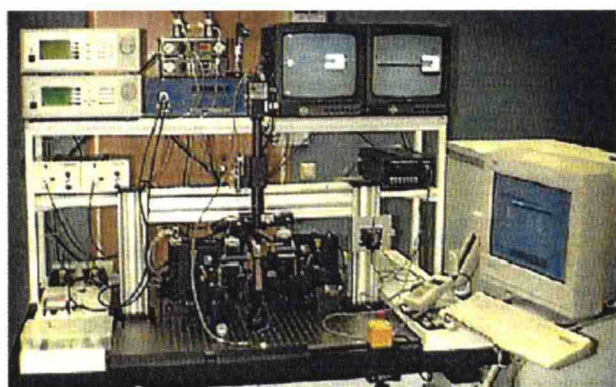
Optisen vaimennuksen mittaus suoritettiin VTT Oulun Newport Auto Align Station laitteistolla katkaisumenetelmällä. Laitteiston jokaisen akselitasen kohdistustarkkuus on 4 nm. SU-8 50TM -ytimiset valokanavat mitattiin 850 nm optisella laserilla. Laitteessa oli 600-kertaisen suurennoskyvyn omaavat hahmontunnistuskamerajärjestelmät. Säteilytehomittarin avulla mitattiin kokonaishäviö. Mittauksessa käytettyjen kytkentä- ja mittakuidun halkaisijat olivat 62,5 ja 200 µm vastaavasti.

Katkaisumenetelmässä näytteet sahattiin erikoisella DISCO HI-TEC GmbH:n valmistamalla polymeerien käsittelyyn soveltuvalla sahanterällä, jolloin valokanaviin saatiin riittävän sileän poikkileikkauspinnan välttääkseen liiallisen kytkentätehon menetyksen. Valonlähde ja ilmaisin kohdistettiin laitteen sallimalla 4 nm:n toleranssilla sahatun kanavan sisään- ja ulostuloon vastaavasti ja kanavassa etenevän 850 nm:n optisen laserin lähettämän valosignaalin vaimennusta mitattiin säteilytehomittarilla.

Kuvassa 36 esitetty SEM- ja kuvassa 4b katkaisumittausmenetelmän laitteisto.



a)



b)

Kuva 36. SEM- (a) ja katkaisumenetelmän laitteisto (b).

Valokanavien päädyt sahattiin joka mittauksen jälkeen tietyltä vakiopituudelta, joka tässä tapauksessa oli 1 cm, jonka jälkeen valonlähde ja ilmaisin kohdistettiin ja optimoitiin uudestaan sisään- ja ulostulolle ja suoritettiin mittaus.

Vaimennusarvon lisäksi katkaisumenetelmän avulla saatiin tietoa mitattavien valokanavien homogeenisuudesta, joka kertoi osaltaan valmistusprosessin toistettavuudesta ja osittain luotettavuudesta. Katkaisumenetelmän teoria käsiteltiin diplomityön teoriaosassa.

Valokanavapiirilevyt arvioitiin myös optisen mikroskopian avulla, jolloin määritettiin kanavien visuaalista homogeenisuutta ja poikkileikkausnäytteiden mittasuhteet. Kuvantamisessa käytettiin Olympus BX60 valomikroskooppia, jonka avulla varmistettiin, ettei valokanavissa ollut suorituskykyyn vaikuttavia defektejä, kuten epäpuhtauksia, ilmataskuja ja -kuplia tai monomeeribulkin jäämiä ytimien välissä. Optisella mikroskoopilla pystytään havaitsemaan pienenkin taitekerroineron omaavien polymeerien valokanavarakenteita.

5.3 Vertailunäytteiden valmistus

Referenssinäytesarjan K1R1 tehtävänä oli toimia vertailukohtana suurtuotantolaitteistolla valmistetuille valokanavapiirilevyille. Näytteiden valmistus tapahtui mikropiirien litografisessa prosesseissa käytetyillä laitteistoilla. Sarjan valokanavat valmistettiin Asperation Oy:n suunnittelemalla lasimaskilla, josta käytettiin viivaleveydeltään 100 µm:n valokanavat.

5.3.1 Alakuoren prosessointi

Valokanavien prosessointi aloitettiin alakuoresta, jolloin puhdistetulle levyille annostettiin noin 5 ml mr-L 6100XP resistiä, jonka jälkeen suoritettiin spinnaus kahdessa vaiheessa. Ensimmäisen vaiheen tarkoituksena oli levittää materiaali koko alustalle, toisessa vaiheessa saavuttaa haluttu kalvopaksuus. Vaiheiden parametrit on esitetty taulukossa 6, jolloin kalvon paksuudeksi saatiin 80 µm. Spinnauksen jälkeen suoritettiin 10 min kestänyt seisotus. Tällöin FR-4 levyille levityksen jälkeen muodostuneet resistireunamat tasoittuvat osittain.

Taulukko 6. Alakuoren mr-L 6100XP spinnausohjelma.

	Pyörimisnopeus (rpm)	Kiihtyvyys (rpm/sek)	Aika (sek)
Vaihe 1:	500	100	10
Vaihe 2:	2000	300	30

Levyt paistettiin kahdessa vaiheessa: kuumalevyllä ja uunissa. Kaksivaiheisen levityksen jälkeisen paiston avulla pyrittiin saavuttamaan polymeeriliuottimen kontrolloitu haihtuminen, jolloin kalvon kostutus ja adheesio substraattiin, pinnan laatu ja tasaisuus pystyttiin varmistamaan. Levyt asetettiin kuumalevyille, jonka alkulämpötila oli 50 °C ja paistoaika 10 min, jonka jälkeen lämpötila nostettiin 90 °C:seen levyjen ollessa kuumalevyllä. Lämpötilan nostettua 90 °C:seen levyt siirrettiin kiertoilmauuniin, joka oli jo valmiiksi kuumennettu 90 °C lämpötilaan.

Paiston 2. vaihe suoritettiin kiertoilmaunissa lämpötilassa 90 °C paistojalla 10 min. Taulukossa 7 on esitetty levityksen jälkeisen paiston parametrit.

Taulukko 7. Esipaiston parametrit.

	Alkulämpötila (°C)	Loppulämpötila (°C)	Aika (min)
Vaihe 1: Kuumalevy	50	90	10
Vaihe 2: Kiertoilmauni	90	90	10

Esipaiston jälkeen suoritettiin relaksaatioseisotuksen huoneenlämpötilassa kalvossa liuottimen haihtumisen myötä muodostuvien liiallisten jännitystilojen välttämiseksi. Esipaiston jälkeen polymeerikerrokseen jää liuotinta, joten se oli vielä tahmea. Mikäli liuotin olisi poistettu täydellisesti kalvosta, mikä vaatisi yli 140°C:een lämpötilaa, siitä seuraisi substraattina toimivan FR-4 levyn liiallinen käyristyminen, jolloin jatkoprosessointi olisi mahdotonta jo siitä syystä, että levy ei olisi saatu kunnolla vakuumiin kiinni seuraavien polymeerikerrosten applikointia varten.

Alakuorikalvon paksuuden homogeenisuutta tutkittiin valmistamalla poikkileikkausnäytteet levyn reuna- ja keskikohdista SEM-mittauksia varten, jolloin todettiin 12 x 12 cm:n kokoisen FR-4-alustan kaikille reunoille noin 0,5 cm:n matkalta 15 µm:n paksumpi kalvo. Muuten kalvon paksuus oli hyvin homogeeninen ja pysyi tavoitteessa 80 µm 3,5 µm:n tarkkuudella. Kyseisen reunakauluksen vaikutusta tutkittiin koesarjassa K1R2, josta kerrotaan tämän diplomityön kappaleessa 7.5.

Seuraavassa vaiheessa näytteet valotettiin Micronovan Mask Aligner Electronic Vision AL6-2 valottimella valotusajalla 30 sek ilman maskia, jonka jälkeen suoritettiin jälkipaisto. Valotuksella ja siitä seuranneella jälkipaistolla käynnistettiin valokemiallinen reaktio, jossa mr-L 6100XP polymeerissä muodostui ristisilloitusreaktion edellyttämät radikaalit. Rauhallisella jälkipaistolla saavutettiin hallitun tasapainon kalvossa jääneen liuottimen haihtumisen ja ristisilloitusreaktion

välille, jolloin haihtumisen ja polymeeriketjujen tiiviimmän rakenteen muodostumisen myötä tapahtuva kalvon tilavuuden pienentyminen ei aiheuttanut kutistumista tai vetäytymistä levyn pinnalta, ja kalvon pinta pysyi ehjänä. Jälkipaiston seurauksena kalvo oli kovettunut.

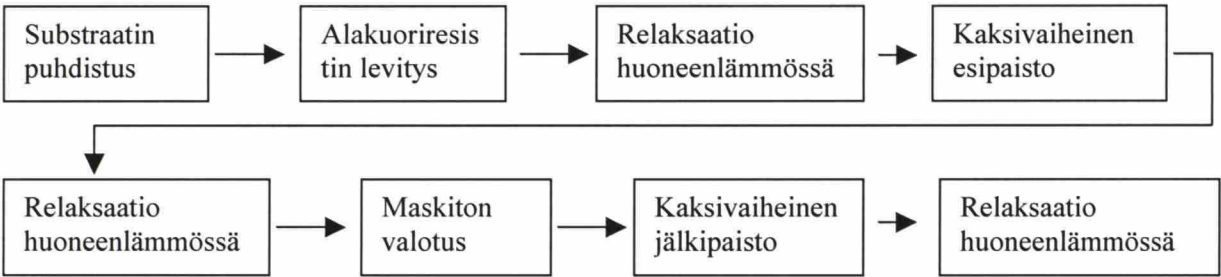
Jälkipaisto suoritettiin esipaiston tapaan kahdessa vaiheessa: vaihe 1 kuumalevyllä ja vaihe 2 uunissa. Vaiheessa 1 levyt asetettiin kuumalevyn päälle lämpötilaan 50 °C ja paistettiin 10 min, jonka jälkeen siirtämättä näytteet kuumalevyltä lämpötila nostettiin 95 °C:seen, jonka jälkeen ne siirrettiin uuniin 95 °C lämpötilaan paistoaajaksi 30 min.

Taulukossa 8 on esitetty alakuoren jälkipaiston prosessiparametrit.

Taulukko 8. Alakuoren jälkipaiston parametrit.

	Alkulämpötila (°C)	Loppulämpötila (°C)	Aika (min)
Vaihe 1: Kuumalevy	50	95	10
Vaihe 2: Kiertoilmauuni	95	95	30

Kuvassa 47 on kaavio alakuoren prosessoinnista.



Kuva 47. Valokanavapiirilevyn alakuoren prosessointi.

5.3.2 Ytimien prosessointi

Ennen ytimen prosessointia alakuoren kalvon annettiin relaxoitua huoneenlämmössä 30 min. Näytteiden ytimenä toimii SU-8 50TM-polymeeri, joka levitettiin myös spinnaamalla taulukossa 9 olevan spinnausohjelman mukaan annostelumäärän ollessa noin 5 ml. Kalvon paksuudeksi saatiin 85 µm SEM-mittausten perusteella.

Taulukko 9. Valokanavaytimen levitysohjelma.

	Pyörimisnopeus (rpm)	Kiihtyvyys (rpm/sek)	Aika (sek)
Vaihe 1:	500	100	10
Vaihe 2:	1500	300	30

10 min kestäneen seisotuksen jälkeen levyt asetettiin kuumalevylle lämpötilaan 65 °C esipaistoa varten. 10 min jälkeen kuumalevyn lämpötila nostettiin 90 °C:seen, jonka jälkeen levyt siirrettiin paistettavaksi 90 °C:seen kiertoilmauuniin 40 minuutiksi taulukon 10 mukaisesti. Ytimen prosessoinnissa esipaiston tarkoituksena oli kovettaa kalvon haihduttamalla siitä liuotinta, mikä mahdollisti maskin kanssa suoritettava kontaktivalotuksen.

Taulukko 10. Ytimen esipaiston parametrit.

	Alkulämpötila (°C)	Loppulämpötila (°C)	Aika (min)
Vaihe 1: Kuumalevy	65	90	10
Vaihe 2: Kiertoilmauni	90	90	40

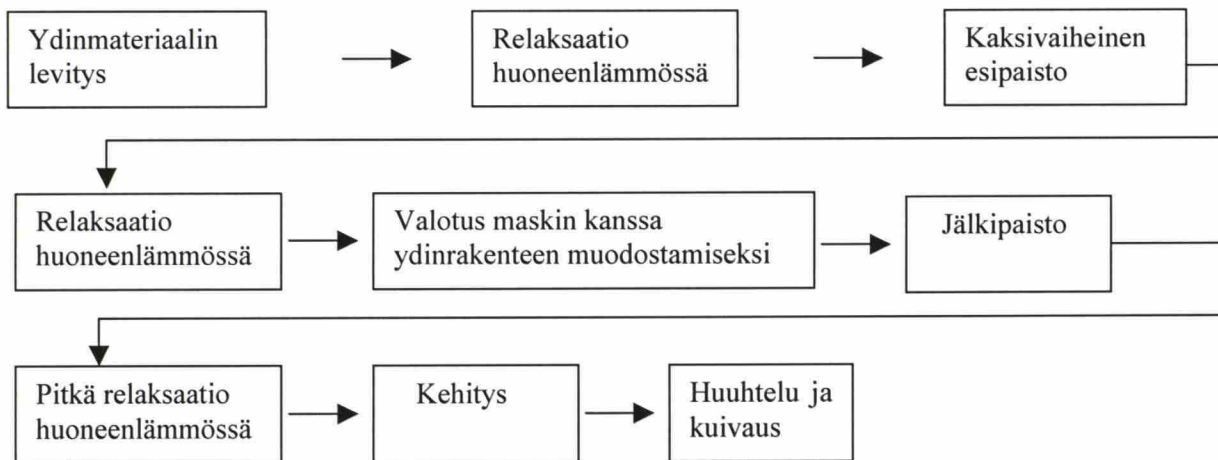
Myös ydinpolymeerikalvolle suoritettiin paksuuden homogeenisuusarvioinnin valmistamalla poikkileikkausnäytteet SEM-mittauksiin levyn reuna- ja keskikohdista, jolloin saatiin vastaavanlaiset tulokset paksuusvaihtelussa reunojen hyväksi noin 10 – 12 µm. Muuten kalvon paksuus oli 3 µm:n tarkkuudella homogeeninen reuna-alueen 0,5 cm:n matkasta lukuun ottamatta.

Valotus suoritettiin Micronovan Mask Aligner Electronic Vision AL6-2 valottimella valotusajalla 20 sek.

Valotetut levyt asetettiin kuumalevyn päälle lämpötilaan 65 °C paistoaajaksi 2 min, jonka jälkeen lämpötila nostettiin 95 °C asteeseen ja levyt paistettiin kyseisessä lämpötilassa 5 min. Paisto aikana valotuksessa UV-säteilylle altistuneet alueet silloittuivat alakuoren prosessointiesityksen kohdalla mainitulla periaatteella. Valokanava rakenne muodostui hyvin pitkälle näiden kahden prosessivaiheen aikana (valotus + jälkipaisto), jolloin kehityksen tehtävänä oli vain ristisilloittamattoman resistin poisto. Jälkipaistoa seurannut relaksaatiovaihe huoneenlämmössä on erityisen tärkeä, sillä vielä kuumien levyjen asettaminen kylmään kehitysliuokseen saattaa osaltaan johtaa lämpötilaeron myötä mikrohalkeamiin valokanavaytimien rakenteessa. Siksi levyjen annettiin jäähtyä huoneenlämmössä 30 min ajan.

Kehitys suoritettiin MicroChemin XP SU-8TM-kehitteessä, jolloin ydinmateriaalina toimivan SU-8 50TM -polymeerin negatiivisen polariteetin ansiosta valottumattomat alueet liukenivat kehitteeseen. Kehitys tapahtui polystyreeniastiassa Virax:n VXR-ravistimen päällä, jolla varmistettiin kehitysliuoksen nopean ja tasaisen pääsyn kaikkiin kohtiin levyn pinnalla kehityksen kestäessä 8 min 30 sek. Veteen liukenematon kehiteliuos poistettiin isopropanolilla ja huuhdeltiin runsaalla DI-vedellä, jonka jälkeen kuivattiin typpipuhalluksella ja asetettiin kiertoilmauniiniin 120 °C asteeseen 15 minuutiksi kuivumaan. Kehityksen aikana mikroskoopilla tarkkailtiin kanavien muodostusta välttääkseen litografiaprosessille tyypilliset yli- tai alivalotusongelmat.

Kuvassa 48 on ytimen prosessointikaavio.



Kuva 48. Ytimen prosessointikaavio.

5.3.3 Yläkuoren prosessointi

Yläkuoren materiaalina käyttämän mr-L 6100XP –polymeerin prosessointiparametrit olivat esipaiston ja valotuksen osalta samat kuin alaeristeen kohdalla kappaleessa 5.3.1. Levitys ja jälkipaisto suoritettiin eri parametrien mukaisesti. Taulukossa 11 on yläkuoren levitysprosessin vaiheet.

Taulukko 11. Yläkuoren mr-L 6100XP spinnausohjelma.

	Pyörimisnopeus (rpm)	Kiihtyvyys (rpm/sek)	Aika (sek)
Vaihe 1:	500	100	10
Vaihe 2:	1000	300	30

Jälkipaisto suoritettiin taulukon 12 mukaisesti.

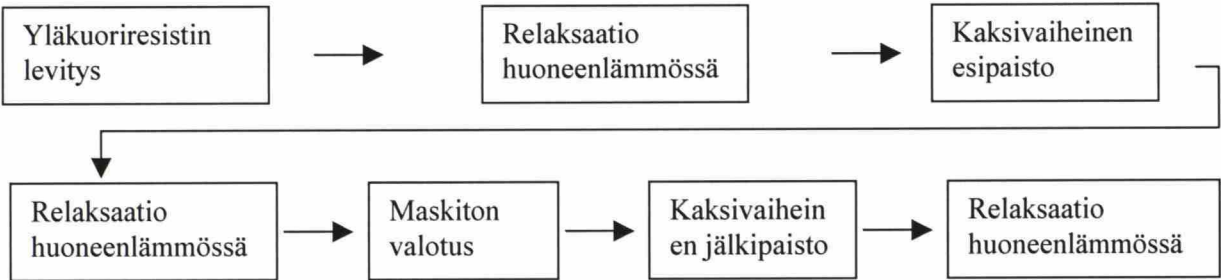
Taulukko 12. Yläkuoren jälkipaiston parametrit.

	Alkulämpötila (°C)	Loppulämpötila (°C)	Aika (min)
Vaihe 1: Kuumalevy	50	100	15
Vaihe 2: Kiertoilmauuni	100	100	40

Jälkipaiston aikana alakuoren ja ydinmateriaalin silloittumisaste korkeamman prosessointilämpötilan ansiosta nousi parantaen valokanavapiirilevyn kemiallista ja fysikaalista kestävyyttä. Toisaalta paistolämpötilaa ei haluttu nostaa yli 100 °C termisten ja mekaanisten rasitusten välttämiseksi, sillä valokanavalevyjen FR4-substraatin lasittumislämpötila T_g on 120 °C ja CTE on 15 ppm/K, silloin kun ydinmateriaalin lämpölaajenemiskerroin CTE on 52 ppm/K.

Yläkuoren valmistuksessa valomikroskoopilla varmistettiin, että valokanavat olivat kokonaan mr-L 6100 resistin peitossa signaalin häiriöttömän kulun varmistamiseksi.

Kuvassa 49 on kaavio valokanavapiirilevyn yläkuoren prosessoinnista.



Kuva 49. Yläkuoren prosessointikaavio.

5.4 Valokanavapiirilevyjen valmistus paneelivalottimella

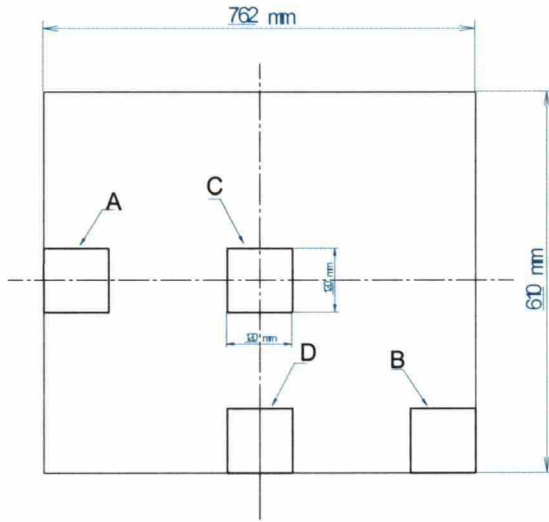
Koesarja K2OL1 valmistettiin Elektroniikan valmistustekniikan laboratorion puhdastilassa sijaitsevalla paneelivalottimella, joka on hyvin samanlainen todellisessa teollisuustuotantoympäristössä olevien valotuslaitteiden kanssa. Tätä pidettiin tärkeänä kriteerinä opinnäytetyössä käytetyn prosessointilaitteiston valinnassa.

Koesarjassa tutkittiin paneelivalottimen soveltuvuutta optisten valokanavapiirilevyjä valmistukseen, ja K2OL1-sarjan näytteet vertailtiin kappaleessa 5.3 esitettyjen mikropiirivalottimella valmistamiin referenssivalokanaviin.

Substraattien esikäsittely, kuori- ja ydinkerrosten levitys ja muu prosessointi tapahtui kappaleessa 5.3 esitettyjen valmistusparametrien mukaisesti. Prosessien vastaavuus oli tärkeä, ja siksi ainoana muuttujana näytesarjassa K2OL1 oli valotuslaite, jolloin mm. kalvon levityksestä aiheuttamat mahdolliset poikkeamat valokanavien karakterisoinnin yhteydessä suljettiin pois.

Koesarjassa 610 x 762 mm:n kokoista piirilevypaneelin valmistusta simuloitiin asettamalla 120 x 120 mm kokoiset levyt valotusalueen eri kohtiin: keskelle, kulmiin ja reunoille.

Koejärjestely on esitetty kuvassa 37.



a)



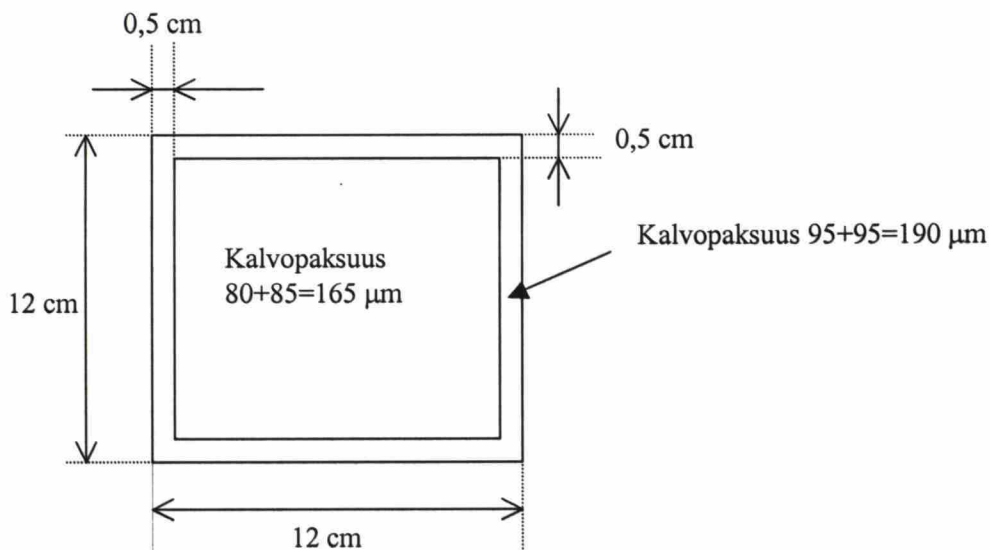
b)

Kuva 37. Skemaattinen esitys K2OL1 näytesarjan asetuksesta OLEC-valottimelle (a); levyjen varsinainen sijainti OLEC-valottimessa (b).

Valottimen keskimääräiseksi tehoksi aktiivisen alueen keskikohdassa säädettiin 0,3475 mW ja keskimääräiseksi intensiteetiksi $6,825 \text{ mJ/cm}^2$. Kyseisiin tehon ja intensiteetin arvoihin päädyttiin referenssisarjan K1R1 perusteella, jossa mitattiin sarjan valokanavien valmistuksessa käytetyn mikropiirivalottimen vastaavat arvot samankaltaisten olosuhteiden luomiseksi, ja käytännön kokeilun perusteella.

5.5 Testisarja kontaktittoman valotuksen tutkimiseksi

Koesarjan K1R2 avulla tutkittiin referenssisarjan K1R1 valokanavapiirilevyjen alakuori- ja ydinkerrosten prosessoinnissa todetun reunakauluksen aiheuttaman lasimaskin ja valotettavien levyjen välisen välyksen vaikutusta kuvionsiirtoon mikropiirivalottimessa. Kyseinen reunakaulus aiheutti kappaleessa 5.3 esitettyjen prosessiparametrien pohjalta $25\text{ }\mu\text{m}$:n etäisyyden maskin ja piirilevyn varsinaisen kuviosiirtoalueen välille kuvan 38 osoittamalla tavalla.



Kuva 38. Alakuori- ja ydinkerrosten applikoinnin tuloksena muodostunut reunailmiö.

Koesarjan valmistussubstraatiksi valittiin kiillotetut 4 tuuman piikiekot, sillä diplomityön kokeellisen osuuden toteuttamisessa käytetyn IGAV FR160A FR-4-laminaatin tiedettiin valmistajan antamien speksien perusteella sisältävän $10\text{ }\mu\text{m}$:n paksuusvaihtelun, jonka mahdollista vaikutusta haluttiin eliminoida. Toisaalta myös mm. CTE-eron synnyttämien jännitystilojen vaikutuksesta johtuva piirilevyjen käyristyminen voitiin piikiekkojen jäykkyyden ansiosta jättää huomiotta.

Testisarjassa käytettiin OHIDA-projektia varten suunnitellun maskin haaroitinkomponentteja, joiden viivaleveys oli $100\text{ }\mu\text{m}$ ja kanavaväli $250\text{ }\mu\text{m}$.

Koesarjassa vertailtiin kontaktissa ja 25, 50 ja 90 µm:n etäisyydellä resistikerroksesta kuvioituja rakenteita. Prosessoitaessa K1R2 sarjan näytteitä huomattiin, että myös kiillotetuilla piikiekoilla esiintyi vastaavanlaista reunakaulusta joskin huomattavasti pienemmässä määrin. Sekä alakuoren että ytimen tapauksessa piikiekkojen reunoilla noin 0,2-0,3 cm:n matkasta todettiin 4-5 µm:n suurempi kalvopaksuus eli 8-10 µm:n yhteisvaikutus kuviosiiroalueeseen nähden, jonka minimoimiseksi testisarja toteutettiin vain valokanavien ydinmateriaalin käyttämän SU-8 50TM polymeerin osalta, jolloin kaulus pieneni vain 4 µm:iin. Näin pystyttiin varmistamaan suhteellisen täydellisen kontaktin lasikaskin ja substraatin välille valotuksen ajaksi.

Saavuttaakseen muiden työssä käsiteltyjen testisarjojen tavoin kanavaytimien 85 µm:n paksuus, muutettiin levitysprosessin parametreja piikiekoille sopivaksi taulukon 12 mukaisesti.

Taulukko 12. Valokanavaytimen levitysohjelma.

	Pyörimisnopeus (rpm)	Kiihtyvyys (rpm/sek)	Aika (sek)
Vaihe 1:	500	100	10
Vaihe 2:	1270	300	30

Muut paisto- ja kehitysvaiheiden parametrit olivat kappaleen 5.3.2 mukaiset.

5.6 Testisarja kalvomaskin avulla paneelivalottimella valmistettujen valokanavapiirilevyjen suorituskyvyn arvioimiseksi

Koesarjan K2OL2 avulla tutkittiin teollisuusympäristössä piirilevyjen valmistuksessa käytettyjen kalvomaskien avulla prosessoitujen valokanavien suorituskyyä. Tavoitteena oli vertailla K2OL2 kanavat ja koesarjan K2OL1 lasimaskin avulla valmistettujen valokanavapiirilevyjen vaimennusarvoja keskenään.

Vertailtavuuden varmistamiseksi testisarjan K2OL2 valokanavat valmistettiin kappaleessa 5.3 esitettyjen prosessiparametrien ja laitteiston mukaisesti maskia lukuun ottamatta, joka tehtiin EVT-laboratorion laitteistolla. Näytteet asetettiin massatuotantovalottimen aktiivisen alueen keskikohtaan välttääkseen kollimoimattomuuden vaikutusta kanavien geometriseen muotoon.

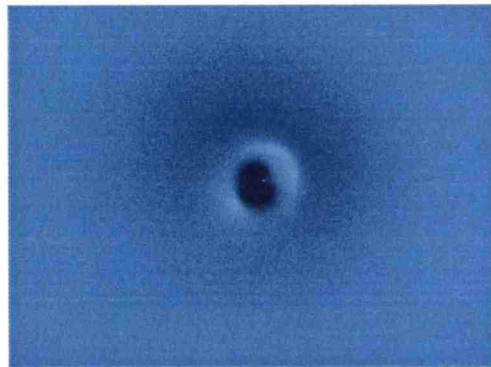
Testisarjan kanavien vaimennusarvot määritettiin katkaisumenetelmällä. SEM:n avulla tutkittiin kanavaytimien geometriset toleranssit ja valokanavassa etenevän signaalin mm. vaiennusta aiheuttavan sivuseinämän laatua.

6 Valokanavapiirilevyjen valmistusprosessin tarkastelu

Alakuori-, ydin- ja yläkuorikerrosten prosessointi nosti esille monia materiaali- ja laitekohtaisiin tekijöihin liittyviä ongelmatilanteita, joiden ratkaisuehdotuksia on esitetty tässä kappaleessa.

6.1 Alakuoren valmistusprosessin kehitys

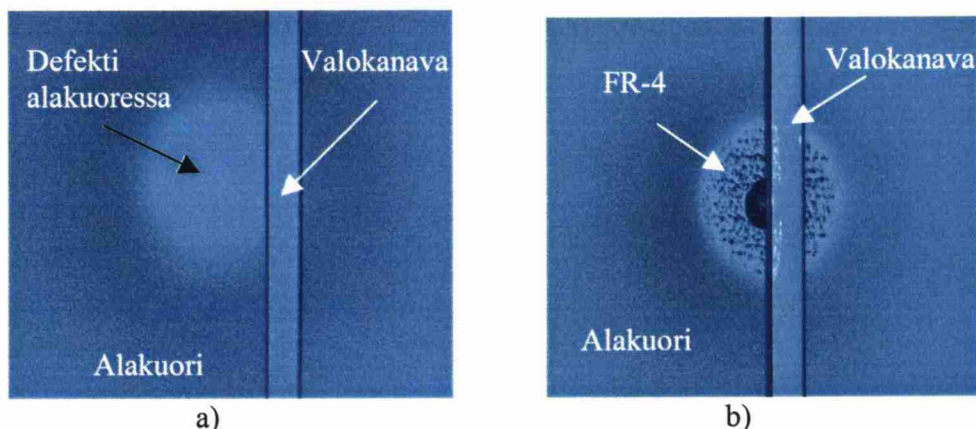
Alakuorena käytetty mr-L-6100 optisen polymeerin applikointiprosessin yleisin defekti liittyi resistikerroksessa esiintyviin reikiin ja painautumiin kuvan 39 osoittamalla tavalla.



Kuva 39. Alakuoreessa esiintyvä reikä.

Kyseisen defektin lähtökohta on hyvin viskoosin alakuoripolymeerin substraatille annostelun ja levityksen yhteydessä muodostuvat ilmakuplat, jotka paistoprosessin jälkeen nousevat pinnalle ja puhkeavat aiheuttaen polymeerikalvosta höyrystyvän liuottimen epätasaisen poistumisen, jonka tuloksena voi kalvopaksuudesta riippuen olla usean kymmenen mikrometrin painautuma tai jopa koko kalvon lävitse FR-4-alustalle asti ulottuva reikä.

Painautumien ja reikien päälle prosessoitu valokanava oli täysin toimintakelvoton. Kuvassa 40 esitetty painautumalla ja läpireiällä olevat valokanavat, jolloin defektien todettiin ylittävän monenkertaisesti viivaleveydeltään 100 µm olevan valokanavan ytimen.



Kuva 40. Valokanava kuopan (a) ja läpireiän (b) päällä

Toinen merkittävä tekijä oli resistikalvon paksuuden reunaepähomogeenisuus, jolloin 12 x 12 cm:n kokoisen FR-4-alustan reunoille noin 0,5 cm:n matkalta keskimäärin 10-12 µm:n paksumpi kalvo kappaleen 5.3 yhteydessä esitettyjen prosessiparametrien mukaisesti. Muuten kalvon paksuus oli hyvin homogeeninen ja pysyi tavoitteessa 3,5 µm:n tarkkuudella.

Syynä tähän oli jo mainittu polymeerin korkea viskositeetiluku ja FR-4-substraatin karheus. Spinnauksessa levitettävä materiaali työntyy alustan keskialueelta kohti reunoja keskipakovoiman pakottavana.

Kolmas valokanavapiirilevyjen alakuoren valmistuksessa esiin tullut ilmiö liittyi 1 mm paksun FR-4-alustan käyristymiseen. Kyseinen ongelma johtui alustan ja polymeerien erisuuruisista lämpölaajenemisparametreista, jolloin prosessissa usein vuorottelevat paistovaiheet kiihdyttivät ilmiötä entisestään.

6.1.1 Alakuoren defektien ehkäiseminen ja kriittisen vaiheen arviointi

Resistikalvoon jääneiden ilmataskujen aiheuttamat virheet olivat ylivoimaisesti tärkeimpiä alakuoren prosessoinnissa.

Kuvissa 39 ja 40 esitetyt defektit saatiin poistettua porrastetuilla paistoparametreilla, jolloin erityisesti alakuoren esipaistovaihe osoittautui kriittiseksi vaiheeksi. Aloittamalla esipaiston matalasta lämpötilasta kuumalevyllä saatiin kalvossa olevat ilmakuplat hitaasti pinnalle ja poistumaan hallitusti, jolloin niiden kalvoon jättämät voidit korjautuivat polymeerin pintajännityksen ansiosta muodostaen tasaisen pinnan, jonka jälkeen levyt voitiin siirtää kiertoilmauuniin paiston jatkamiseksi.

Reunaepähomogeenisuusilmiön osittaiseksi ehkäisemiseksi levyille suoritettiin seisontavaihe ennen esipaistoa kappaleen 5.3 mukaisesti, jolloin pintajännityksen ohjaamana resisti pyrki tasaantumaan. On kuitenkin otettava huomioon itse FR-4-substraatin sisältämät paksuusvaihtelut, jotka voivat olla valmistajan antamien speksien mukaan kymmeniä mikrometriä. Tällöin liian pitkä seisontavaihe saattaa johtaa levitetyn resistin hallitsemattomaan liikkumiseen substraatilla alustan paksuusvaihtelun ohjaamana, mikä voi johtaa vielä suurempiin paksuusvaihteluihin koko polymeerikalvossa ei pelkästään 0,5 cm:n reuna-alueilla.

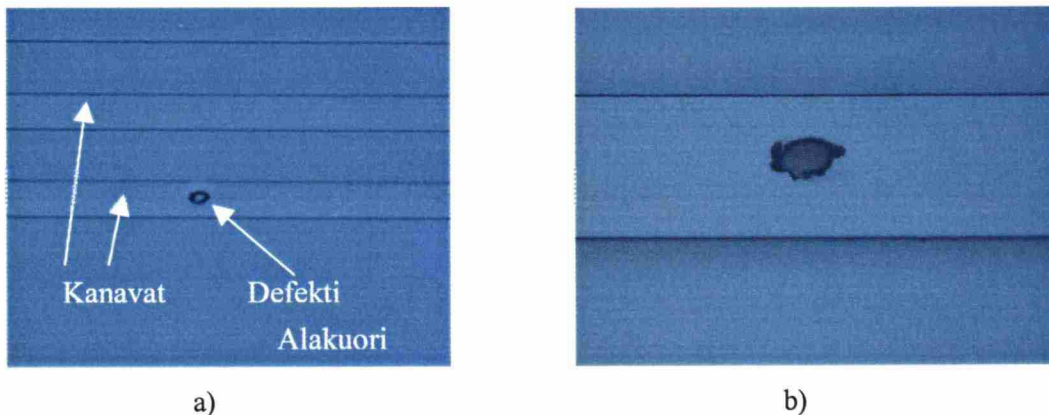
Levyjen käyristyminen useiden resistikerrosten takia saatiin vähennettyä käyttämällä takapuolelta kuparoituja substraatteja. Levyjen jäykistäminen lisäämällä niiden paksuutta edesauttaa käyristymisen ehkäisemistä, mutta tässä diplomityössä käytettiin ≤ 1 mm paksuja substraatteja laitekohtaisten rajoitusten vuoksi.

Toinen käyristymistä vähentävä tekijä oli prosessilämpötilojen pysyminen FR-4-alustan lasittumislämpötilan alapuolella, mikä vähensi rakenteeseen kohdistuvaa termistä rasitusta minimoiden CTE-eroista johtuvat ongelmat.

6.2 Valokanavien ydinten valmistusprosessin kehitys

Ydinmateriaalina käytetyn SU-8 50TM optisen polymeerin prosessikehityksen aikana esiintyneet ongelmatilanteet levityksessä olivat hyvin pitkälle samanlaisia alakuorena käytetyn mr-L 6100XP resistin kanssa. Toisaalta levitettyyn polymeerikalvoon ilmataskujen aiheuttamien läpireikien ja painautumien kontrollointi osoittautui kokeellisesti helpommaksi.

Kuvassa 41 on SU-8 50TM-kerrokseen jäänyt kupla, joka myöhemmässä litografiavaiheessa jäi valokanavaan aiheuttaen kriittisen vahingon kyseisen valokanavan toiminnallisuudelle.



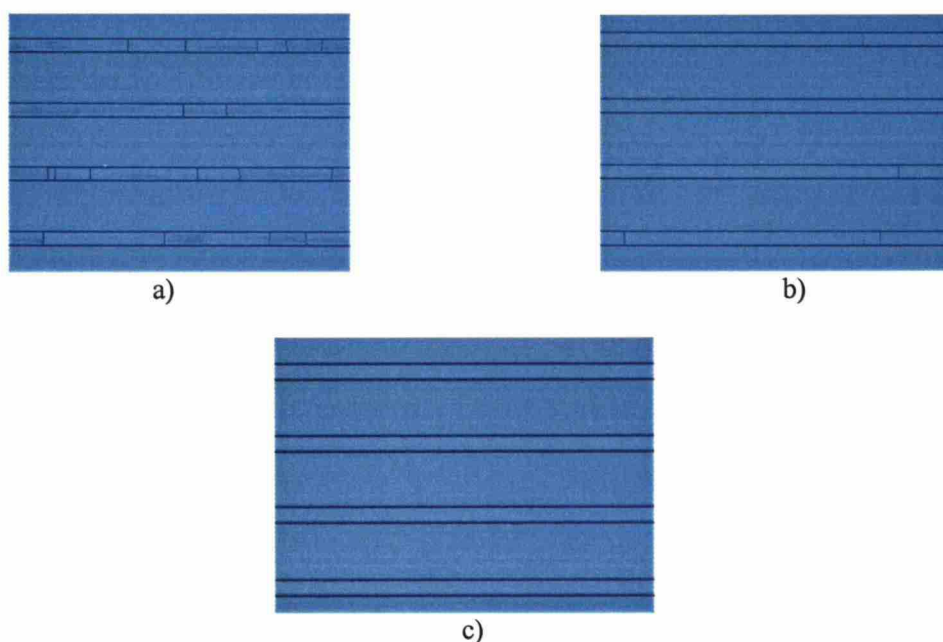
Kuva 41. Valokanavan ytimessä oleva reikä 5- (a), ja 20-kertaisella (b) suurennoksella.

Myös alakuoriresistin kohdalla jo mainitut 12 x 12 cm piirilevyn reunoille levitysprosessin myötä muodostuneet vaihtelut resistikalvon paksuudessa olivat samaa luokkaa ydinmateriaalinkin tapauksessa.

Ytimen prosessoinnissa optimaalisten valotus-, jälkipaisto- ja kehitysparametrien yhteisvaikutuksen määrittäminen virheettömien valokanavien muodostamiseksi osoittautui suuremmaksi haasteeksi kuin kuvassa 41 esitetty ongelmatilanne, erityisesti valmistaessa yhtäaikaaisesti eri viivaleveyden omaavia valokanavia.

Valotus-jälkipaisto-kehitysvaiheiden erillisvaikutuksen määrittämisessä ja optimoinnissa käytettiin ANOVA-testimallia, jossa varioidaan yksi parametri muiden ollessa vakioita. Muuttujien vaikutusta valokanavaan tarkasteltiin optisella ja SEM-mikroskoopilla reunan laadun, mikrohalkeamien, adheesion ja sivuseinämän karheuden suhteen

Kuvassa 42 on eri valotusaikaparametrien vaikutus 50 μm :n kanavaytimiin optisella mikroskoopilla tarkasteltuna muiden vaiheiden pysyessä vakiona.

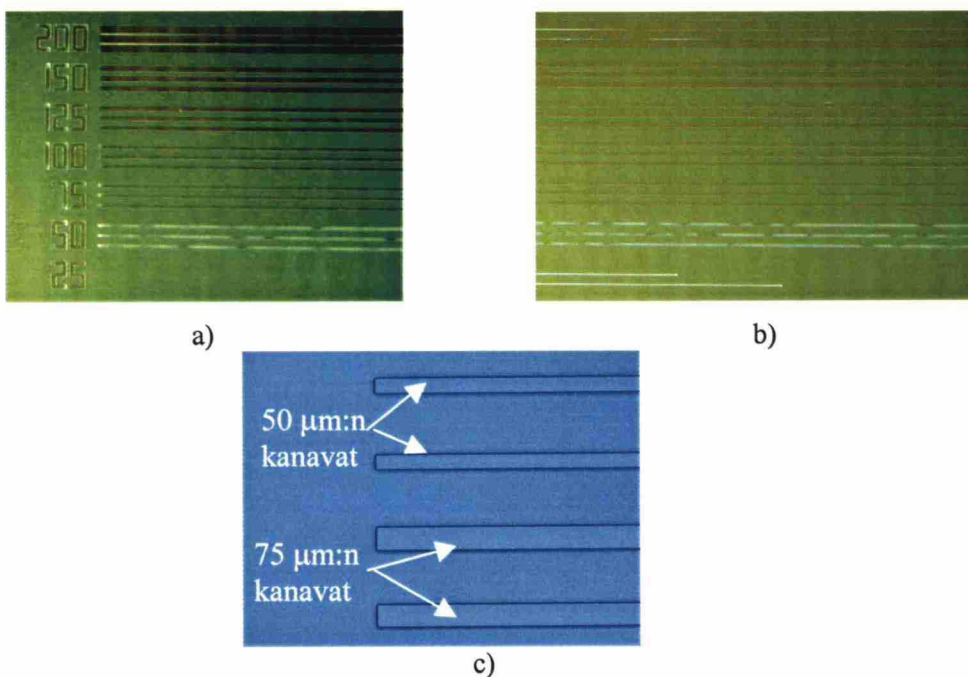


Kuva 42. Valotusajan vaikutus kanavaytimissä olevien mikrohalkeamien esiintymiseen: lyhyin valotusaika (a); keskipitkä valotusaika (b); optimaalinen valotusaika (c).

Kuvan 42 a- ja b-kohtien perusteella nähdään liian lyhyelle UV-valotukselle altistuneissa valokanavaytimissä esiintyvän mikrohalkeilua. Mikrohalkeilu johtui luultavasti CTE-erosta ja polymeerin matalasta silloitusasteesta. Riittämätön valotusaika johti UV-säteilyn määräämän ja jälkipaistonvaiheen katalysoiman ristisilloitusreaktion jäämistä pienemmälle asteelle (alle 90-100%), jolloin CTE-eron myötävaikutuksesta FR-4 alustaan nähden suuremman lämpölaajenemiskertoimen omaavaan ydinpolymeeriin muodostuivat kuvan 42 a- ja b-kohtien osittamat defektit.

Toisaalta optimoimalla prosessointiparametrit saatiin valmistettua halkeamavapaat valokanavat kuvan 42 c osoittamalla tavalla.

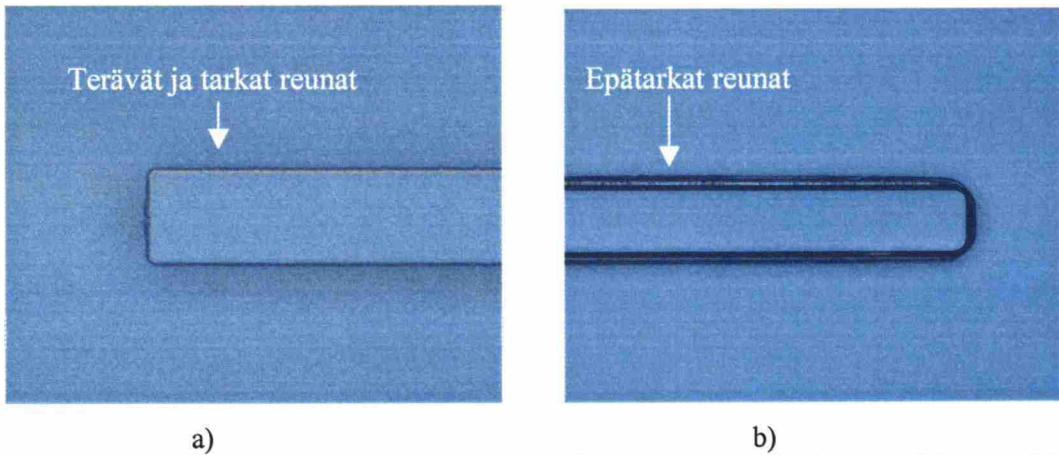
Valmistaessa yhtäaikaaisesti eri viivaleveydet omaavia valokanavia huomattiin riittämättömän valotuksen aiheuttavan alle 75 μm :n kanavaytimien lift-off-ilmiön, jossa kanavat irtosivat kuvan 43 a- ja b-kohtien osoittamalla tavalla. Adheesion pettämiseen osattiin kuitenkin varautua osittain polymeerimateriaalin valmistajan prosessispeksien ansiosta. Säättämällä prosessointiparametrit kohdalleen saatiin valmistettua monileveyksiset ytimet yhtäaikaisesti (kuva 43 c).



Kuva 43. 25 μm :n valokanavien täydellinen irtoaminen ja 50 μm :n kanavien osittainen delaminointi (a) ja (b); täysin onnistunut eri viivaleveydet omaavien valokanavien valmistus samanaikaisesti (c).

Valmistusprosessin kehityksessä suurta huomiota kiinnitettiin ym. asioiden lisäksi myös kanavaytimien reunojen laatuun.

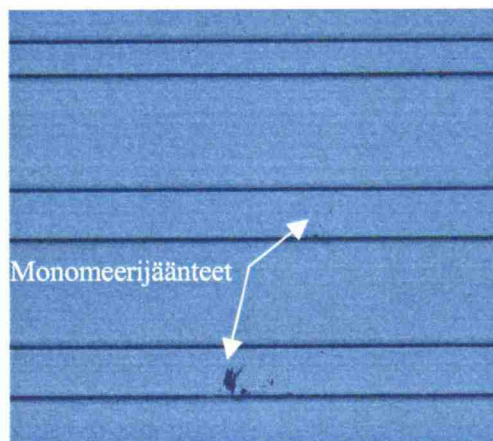
Kuvassa 44 on eri valotusparametreilla valmistettuja valokanavan ytimiä.



Kuva 44. Optimoidun valotusajan aikaansaama valokanava (a); ylivalotettu valokanava (b).

Kuva 44 b-kohdan valokanavanytimen reuna on epätarkka ylivalotuksesta johtuen, silloin kun a-kohdan tapauksessa optimoitu valotusaika antoi terävän ja tarkan valokanavareunan. Kuvassa 44 b esitetty tilanne asettaa ylärajan valotusajalle.

Valokanavien kehitysvaiheessa esiin tullut virhetilanne liittyi itse kehitysluoksen aktiivisuuteen, joka luonnollisesti väheni prosessoitaessa siinä suuren määrän levyjä (kuva 45). Tällöin liuosta oli tietysti vaihdettava.



Kuva 45. Ylikyllästetystä kehitysluoksesta kanavien pinnalle ilmestyneet monomeerijäämät.

6.2.1 Valokanavaydinten defektien ehkäiseminen ja kriittisen prosessivaiheen arviointi

Edellä esitettyjen tapausten pohjalta valotusaikaparametrin vaikutus on ylivoimaisesti kriittisin vaihe koko valokanavapiirilevyn toiminnallisuuden kannalta työssä käyttämien materiaalivalintojen osalta. Varioimalla järkevissä rajoissa valotuksen jälkeisen paistovaiheen parametreja ei esimerkiksi saatu vähennettyä tai lisättyä alivalottumisen myötä CTE-eron aiheuttamia mikrohalkeamia tai parantamaan kanavien reunalaatua.

Kuvan 42 a- ja b-kohdissa esitetyt mikrohalkeamat saatiin poistettua kokonaan pidentämällä valotusaikaa ja suorittamalla relaksaatiovaihe jälkipaiston jälkeen ennen kehitysluokseen laittamista. Relaksaatio tapahtui asettamalla optiset piirilevyt lämpöeristeen päälle, jolloin jäähdytysprosessi tapahtui pääasiassa konvektion ohjaamana hyvin hitaasti vähentäen CTE-eroista johtuvien jännitystilojen voimakkuutta.

Kuvan 43 a- ja b-kohdissa tarkasteltujen pienemmän viivaleveyden omaavien valokanavien irtoaminen saatiin estettyä priorisoimalla niiden valotusparametria, mikä käytännössä tarkoitti UV-valotuksen pidentymistä, jolloin SU-8-50 polymeerin ja mr-L-6100 alakuoren funktionaaliset ryhmät pääsivät reagoimaan tehokkaammin keskenään estäen adheesion pettämisen. Toisaalta lyhentämällä kehitysaikaa ei saavutettu haluamaa tulosta, sillä varsinkin 200 µm:n kanavien välissä oli optisella mikroskoopilla tarkasteltuna havaittavissa kehittymätöntä monomeeria, ja kehitystä oli jatkettava tilanteen korjaamiseksi. Tästä syystä valotusparametri nousi kriittiseen asemaan tässäkin tilanteessa.

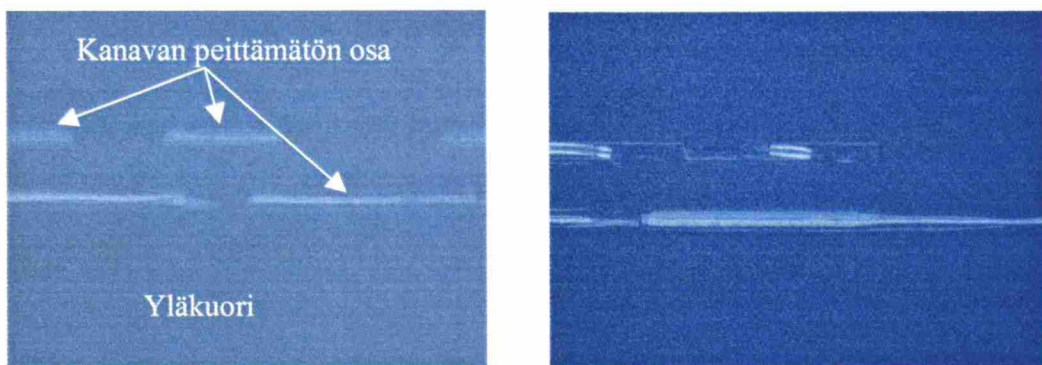
Kuvan 44 b esittämä tilanne johtui selkeästi valotusajan liiallisesta pidentämisestä.

Kuvan 45 tilanne oli helposti korjattavissa suorittamalla kehityksen tuoreessa liuoksessa, jolloin kanavien sivuseinämiin ja pinnalle tarttuneet monomeerijäänteet liukenivat pois ilman että varsinainen rakenne kärsi millään tavalla.

6.3 Yläkuoren valmistusprosessin kehitys

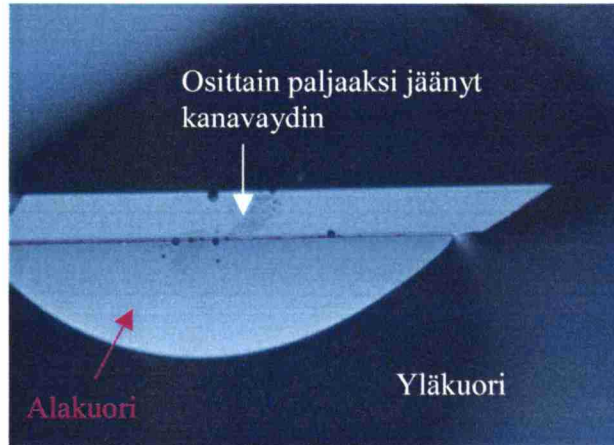
Polymeerivalokanavarakenteen yläkuoren valmistuksessa haasteet liittyivät kanavaytimien täydelliseen peittymiseen, materiaalin vetäytymiseen alempien kerrosten päältä ja korkean viskositeetin mukana tuomiin kuplaisuusvirheisiin.

Valokanavaytimien peittämättömyystilanteet johtuivat lähinnä liian nopeiden levitysparametrien takia. Toinen syy oli mr-L-6100XP resistin liian pienessä annostelumäärässä. Toimivat levitysreseptit ja annostelumäärät esitetty tämän diplomityön kappaleessa 5.3. Kuvassa 46 esitetty tilanne, jossa osa valokanavaytimeistä jäi paljaaksi yläkuoren applikoinnin jälkeen.



Kuva 46. Yläkuoren vain osittain peittämät valokanavaytimet.

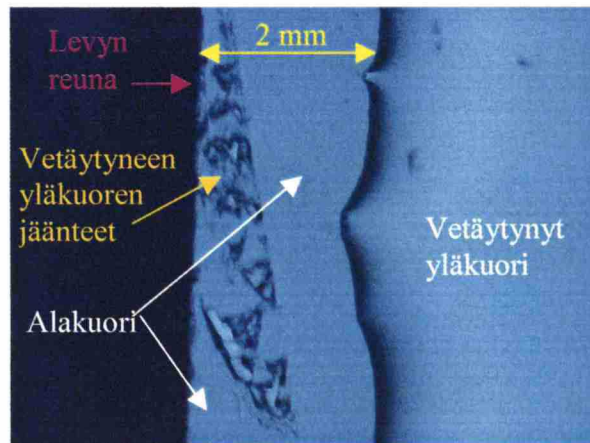
Toinen ytimien osittaiseen peittämättömyyteen liittyvä ongelmatilanne liittyi luultavammin kostutukseen (kuvan 47), koska muut ongelmaa aiheuttavat tekijät, kuten epäsoivat levitysparametrit ja annostelumäärän riittämättömyys poistettiin.



Kuva 47. Yläkuorimateriaalin epäpuhtauksien aiheuttama kostutusongelma.

Kuvan 47 osoittama tilanne oli harvinainen ja johtui luultavammin edellisistä prosessivaiheista levyille jääneiden kosteuden ja/tai monomeerien vaikutuksesta.

Sen sijaan kuvassa 48 esitetty tilanne, jossa yläeriste vetäytyi alakersteen päältä piirilevyn reunoilla oli hyvin yleinen tilanne, ja esiintyi ainoastaan levyn reunoilla.



Kuva 48. Yläkuoripolymeerin vetäytymiseen levyn reunoilla alakuoren päältä

Kuvan 48 tilanne saattoi johtua siitä, että alakuori, joka valmistettiin jo alkuvaiheessa, läpikävi kaikki sitä seuraavat ytimeen ja yläkuoren valmistukseen liittyvät prosessivaiheet termisten käsittelyineen vieden sen ristosilloittamisastetta kohti 100%.

Kuvassa 49 on resistin korkean viskositeetin takia kalvossa olevan ilmakuplan kontrolloimattoman poistumisen myötä muodostunut defekti.



Kuva 49. Ilmakuplan jättämä defekti yläeristeeseen.

Yläkuoren tapauksessa eniten ilmakuplia muodostui valokanavien välisessä tilassa, mikä selittyy sillä, että ilma jää helpommin resistin alle loukkuun juuri kahden kanavaseinämän väliin.

6.3.1 Yläeristeen defektien ehkäiseminen ja kriittisen parametrin arviointi

Edellä esitettyjen tapausten pohjalta ja koko valokanavan toiminnan kannalta yläkuoren ehdottomasti kriittisin prosessivaihe liittyi ytimien täydellisen peittämiseen. Paljaaksi jääneet ytimet altistuvat käyttöympäristön epäpuhtauksille, kuten pölylle ja kosteudelle.

Kuvassa 46 esitetyn tilanteen ratkaisemiseksi lisättiin resistin annostelumäärän ja pienennettiin spinnauksen 2. vaiheen pyörimisnopeutta kappaleessa 5.3 esitettyjen parametrien mukaisesti.

Kuvassa 47 esitetty tilanne oli hyvin harvinainen, ja jonka ehkäisemiseksi optiset piirilevyt tulisi pestä ja kuivattaa huolellisesti kehityksen jälkeen ennen seuraavan polymeerikerroksen prosessointia.

Toisaalta yläkuoren vetäytyminen levyjen reunoilla kuvan 48 osoittamalla tavalla saatiin tehokkaasti kontrolloitua vähentämällä resistin levityksen jälkeisen esipaistovaiheen kestoja ja asettamalla levyt valotukseen ja jälkipaistoon. Kappaleessa 5.3.3 esitettyjen jälkipaistoparametrien avulla saavutettiin hallitun tasapainon hydrofobiseksi muuttuneen alakuoren pinnalta vetäytyvässä yläeristeessä tapahtuvien reaktioiden välille. UV-säteilyn määräämä ja lämpökäsittelyn katalysoimalla ristisilloitus jäykisti ja tiivisti polymeeriketjut estäen resistikalvon vetäytymisilmiön.

Esipaistoa ei kuitenkaan voitu jättää liian lyhyeksi tai kokonaan pois kuvassa 49 osoitetun ongelman takia. Hyvin korkean viskositeetin omaavan resistiin muodostuvat ilmakuplat, joiden tehokas ja toimiva ehkäisy on juuri kalvon levitysprosessia seuraavaa esipaisto. Ilmakuplien aiheuttamien defektien poistomekanismi on identtinen alakuoren ongelmatilanteiden ratkaisukappaleessa esitettyjen kanssa. Kyseessä oli siis kompromissien hakeminen vetäytymisilmiön ja kalvon eheyden välille.

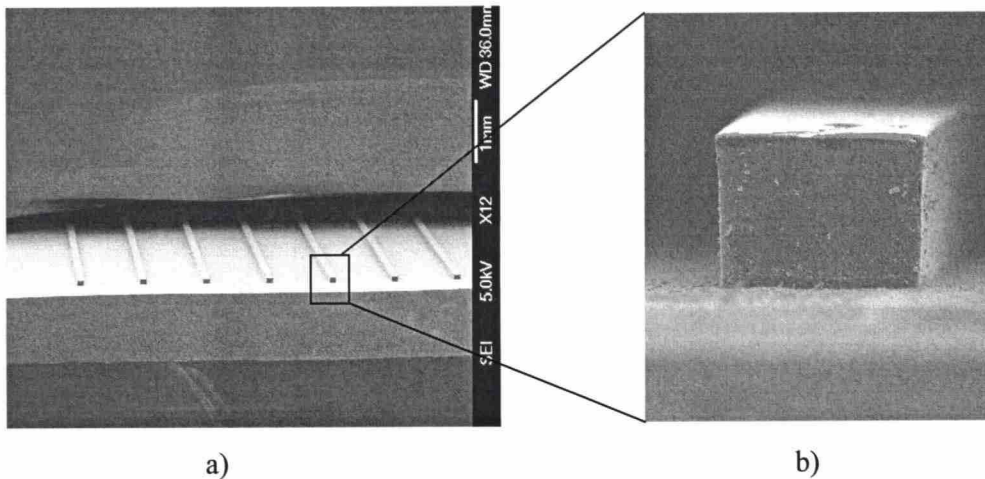
7 Tulokset ja niiden tarkastelu

Tässä kappaleessa käsitellään diplomityön kokeellisessa osassa tehtyjen koesarjojen tulokset ja niiden analyysit. Eri mittaustulosten vertailu suoritettiin kappaleessa 5.2 esitettyjen kriteerien ja menetelmien avulla.

7.1 Vertailunäytetestisarjan tulokset

Vertailunäytesarjan K1R1 polymeerivalokanavien evaluoinnissa SEM-laitteiston avulla saatiin analysoitua valokanavien päätyprofiilit ja sivuseinämien karheus.

Kuvassa 50 esitetty mikropiirityökaluilla valmistettujen valokanavien yleisnäkymä ja kanavaprofiilin muodot.

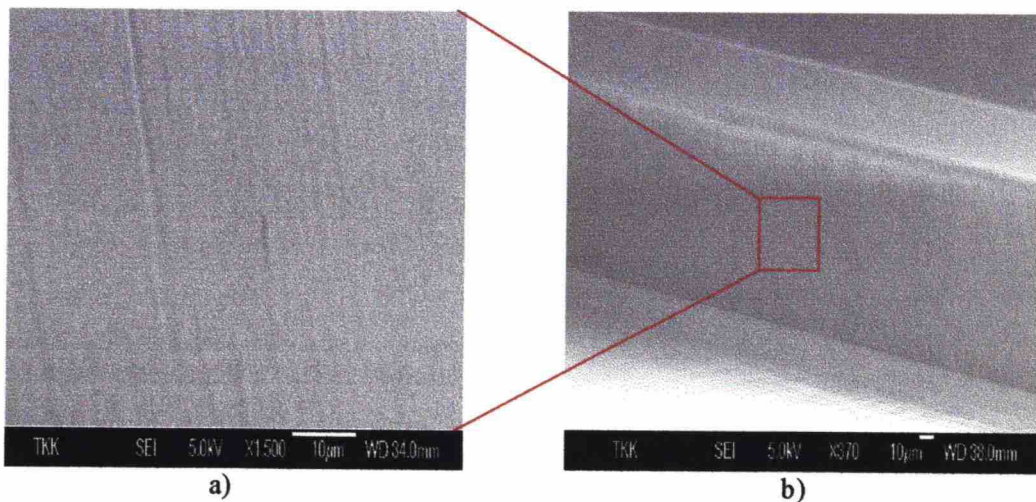


Kuva 50. Mikropiirityökaluilla näytesarjassa K1R1 valmistettujen valokanavien yleisnäkymä (a); 500-kertainen suurennos kyseisen koesarjan valokanavan päädyistä (b).

Kuvasta 50 havaitaan prosessin onnistuneen hyvin SU-8-50TM-ytimen päädyn terävän ja suorakaiteen muotoisen profiilin takia, mikä indikoi niiden valmistuksessa käytetyn mikropiirivalottimen valolähteen tuottaman spektrin sopivuuden valokanavan ytimen

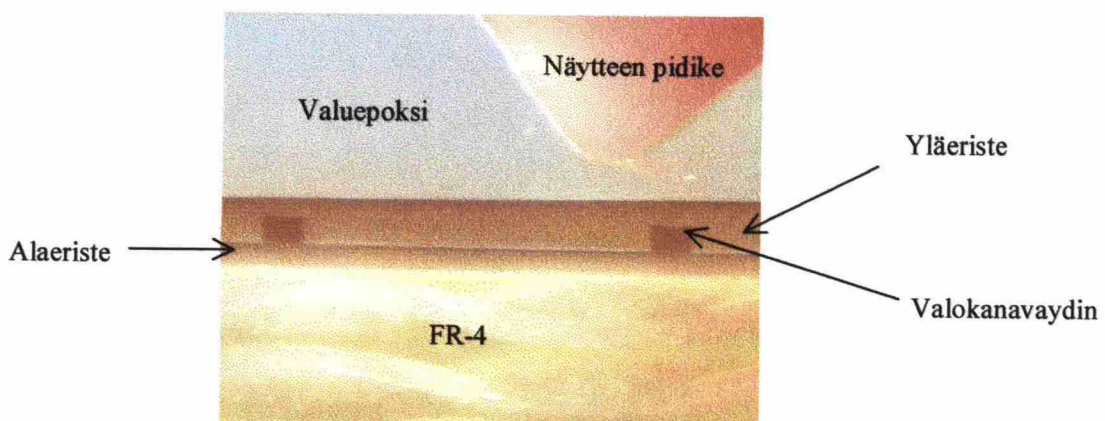
polymeerin teknisten vaatimusten kanssa ja säteiden 90-asteista tulokulmaa suhteessa substraattiin kollimoinnin ansiosta.

Kuvassa 51 esitetty koesarjan valokanavan sivuseinämän karheus, jolloin 1500-kertaisella suurennuksella (kuva 51 a) otetussa kuvassa havaitaan pientä epätasaisuutta.



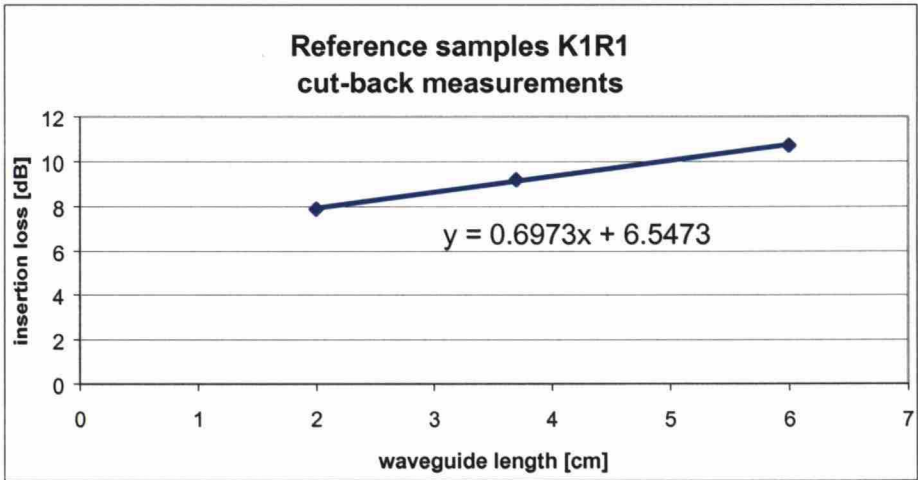
Kuva 51. Valokanavan sivuseinämän 1500- (a) ja 370-kertainen suurennus (b).

Kuvassa 52 on optisella mikroskoopilla otettu poikkileikkauskuva vertailunäytesarjan valokanavista.



Kuva 52. Poikkileikkauskuva näytesarjan K1R1 valokanavista.

Referenssisarjan valokanavapiirilevyjen optisen signaalin vaimennusarvojen tulokset on esitetty kuvassa 53.

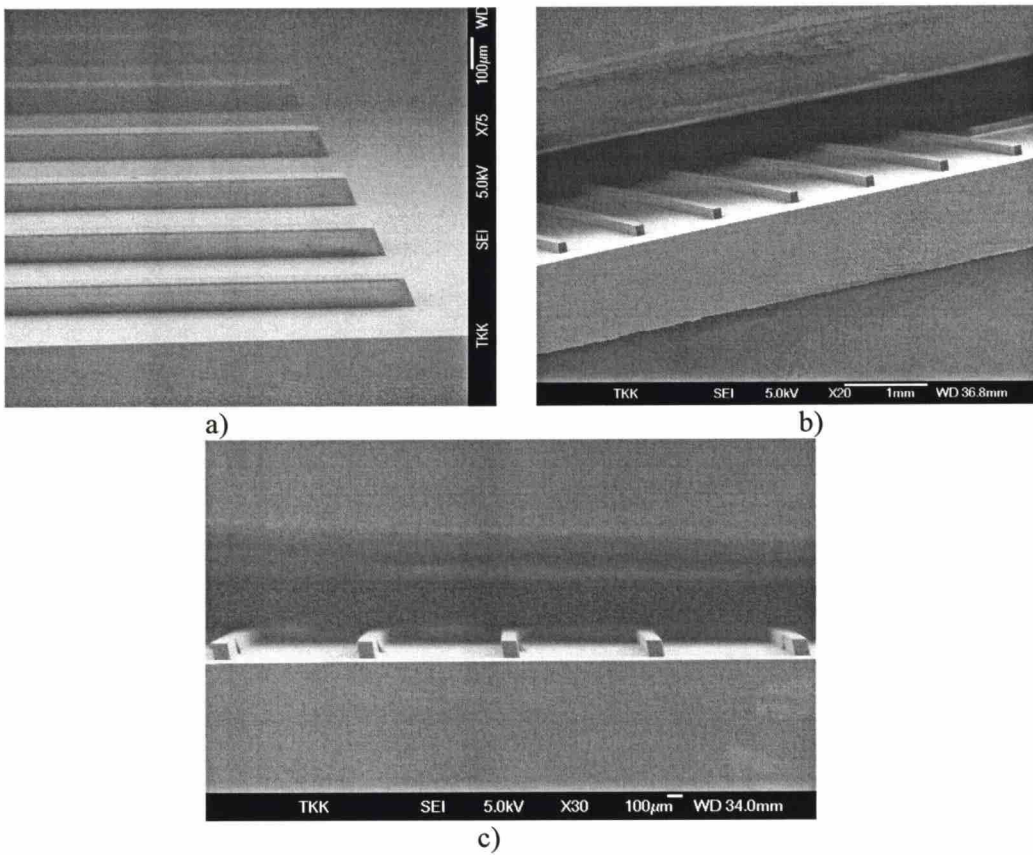


Kuva 53. Vertailunäytesarjan katkaisumenetelmän mittaustulokset.

Mittausten tuloksena saatiin suoran kulmakertoimeksi 0,6973, joka on samalla valokanavissa etenevän signaalin vaimennusarvo.

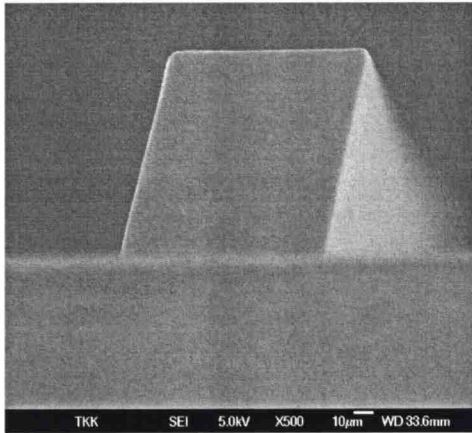
7.2 Paneelivalottimella valmistettujen valokanavapiirilevyjen tulokset

Paneelivalottimella valmistetut K2OL1 testisarjassa valokanavien muoto riippui selkeästi levyjen sijainnista valottimen valotusalueella suhteessa valolähteeseen. Kuvassa 54 esitetty alueen kulmassa, keskikohdassa ja reunalla valotettujen piirilevyjen valokanavien yleisnäkymä.

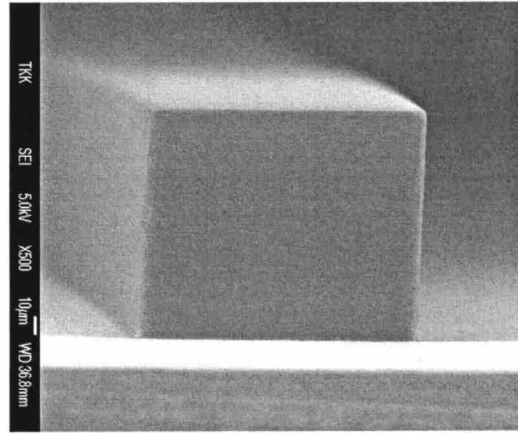


Kuva 54. Paneelivalottimen aktiivisen alueen kulmassa (a), keskikohdassa (b) ja reunalla (c) sijainneiden levyjen yleisnäkymät

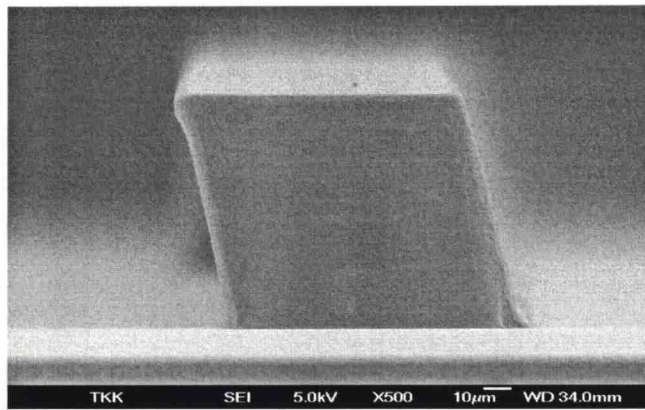
Kuvassa 55 nähdään selvästi kollimoimattoman valolähteen aiheuttamat muutokset valokanavien muodossa. Kuvien suurennos on 500-kertainen.



a)



b)

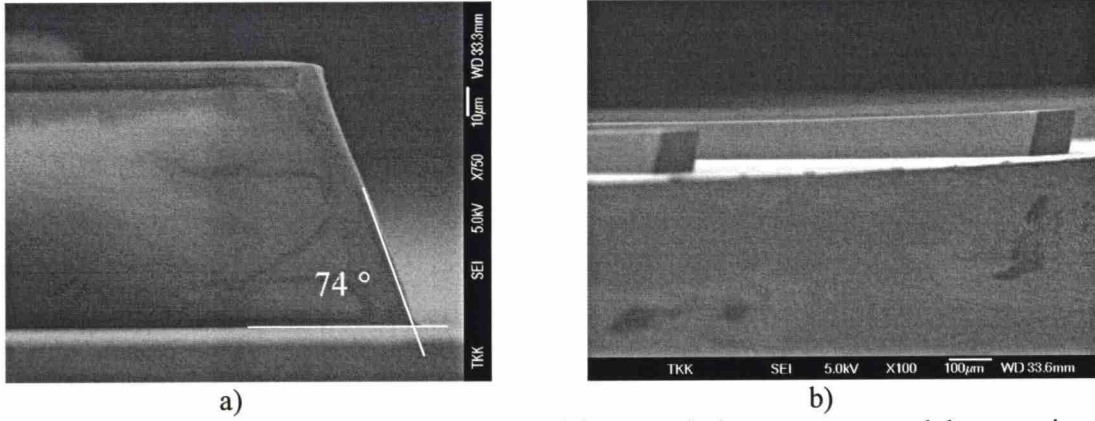


c)

Kuva 55. Kollimoimattoman valolähteen vaikutukset valokanavien päätyihin piirilevyissä, jotka sijaitsevat suurtuotantopaneelivalolähteen kulmassa (a), keskikohdassa (b) ja reunalla (c).

Kuva 55 b osoittaa aktiivisen alueen keskikohdassa eli aivan valolähteen alapuolella sijainneiden piirilevyjen valokanavien valmistuksen onnistuneen aivan odotusten mukaisesti: kanavaytimien päätyjen profiilit olivat terävät tasasuunnikkaan muotoiset kaikkein kanavakulmien ollessa 90° , mikä indikoi lampun lähettämien säteiden 90° :een tulokulmaa levyn nähden.

Paneelivalottimen kulmassa sijainneiden levyjen kollimoimattoman valolähteen aiheuttama kanavaytimien geometrisen muodon muutos on myös seuraavassa SEM-kuvassa 56, josta saatiin määritettyä kallistuskulman suuruudeksi 74° .



Kuva 56. Kollimimattomuuden vaikutus valokanavaytimien muotoon: valokanavaytimen muodon tarkastelu etu- (a) ja takapästä (b).

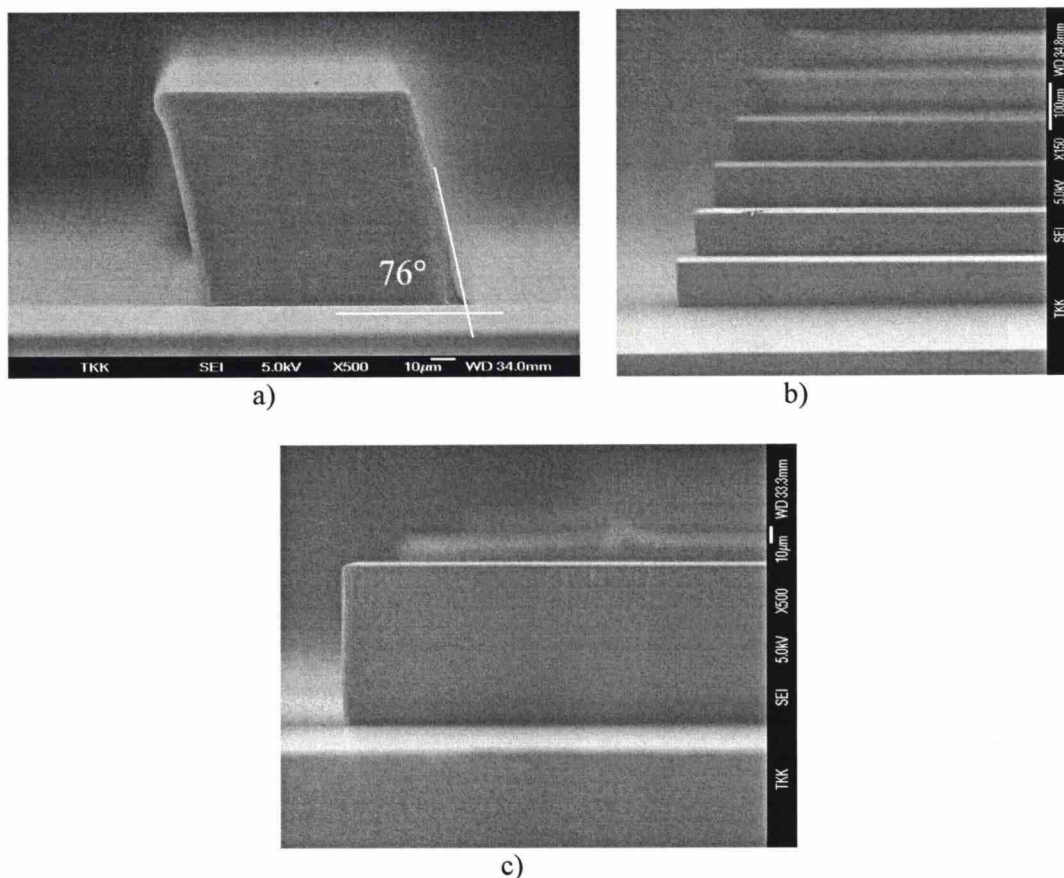
Kuvan 56 suurtuotantovalottimen kulmassa sijainneiden piirilevyjen valotuksessa muodostuneet poikkeamat halutusta 90° :een kulmasta vastasivat hyvin yksinkertaisella sädeoptisella mallilla laskettua tulosta. Mallissa otetaan huomioon pinnalle saapuvien säteiden tulokulma pintatason normaalin suhteen ja rajapintojen taitekertoimien arvot, jolloin tuloksena saadaan valon taittumiskulma eli tässä tapauksessa valon etenemissuunta polymeerissä. Kaavassa 2 esitetty kyseinen malli, jossa $n_1 = 1$ ja $n_2 = 1,67$ ovat vastaavasti ilman ja silloittamattoman SU-8 50TM-polymeerikalvon taitekertoimet, θ_1 = säteiden tulokulma pinnan normaalin suhteen = $90^\circ - 60,539^\circ = 29,461^\circ$.

$$n_1 * \sin \theta_1 = n_2 * \sin \theta_2 \quad (2)$$

$$\rightarrow \theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} * \sin \theta_1\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,67} * \sin 29,461^\circ\right) = 17,13^\circ$$

$$\rightarrow 90^\circ - 17,13^\circ = 72,87^\circ$$

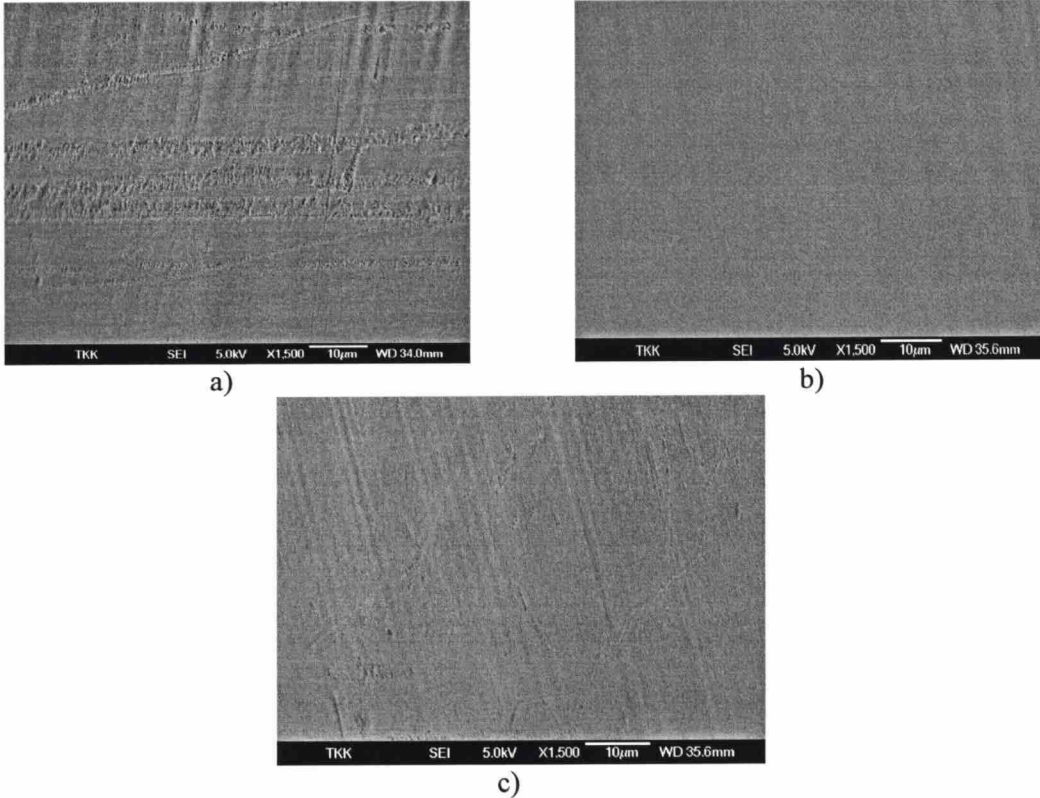
Vastaavanlainen tilanne oli nähtävissä reunoilla valotettujen piirilevyjen valokanavissa kuvan 57 osoittamalla tavalla. Kuva osoittaa selkeästi valokanavan poikkileikkausprofiilin muuttuneen valottimen kollimoimattomuuden takia 76° :ksi (kuva 57 a) niiden sivuprofiilin pysyessä kuitenkin 90° :een kulmassa, koska ne sijaitsi aivan reunan keskikohdassa (kuvat 57 b ja c) kappaleessa 5.4 esitetyn kaavion 37 a mukaisesti.



Kuva 57. Suurtuotantovalottimen aktiivisen alueen reunalla valotettujen piirilevyjen valokanavien kuvat: poikkileikkausprofiilin kallistumiskulma 76° (a); kanavien sivuprofiilit (b) ja (c).

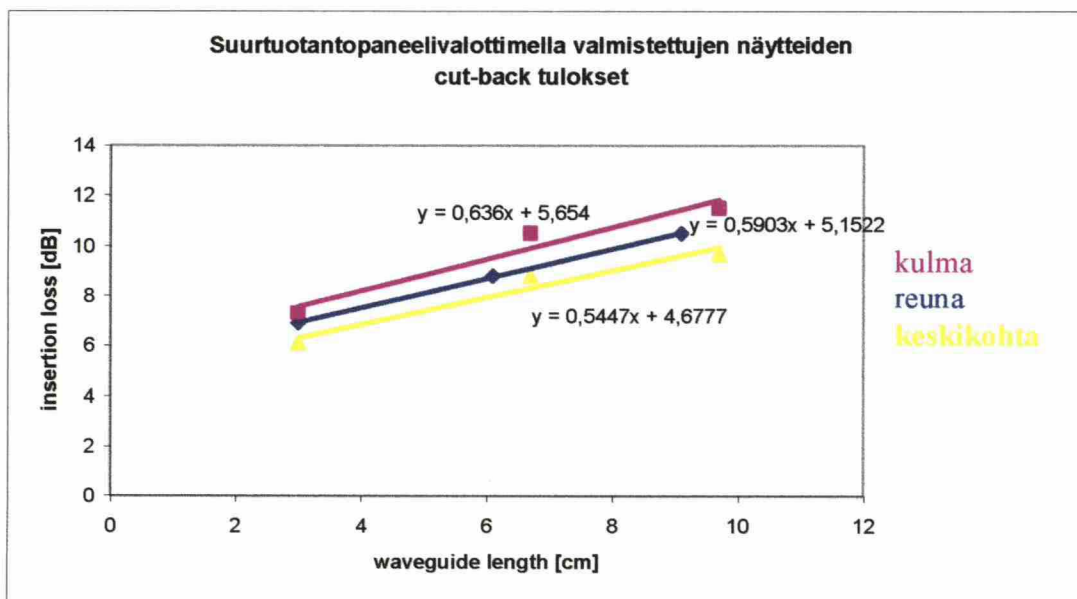
Myös reunalla valotettuihin näytteisiin kollimoimattomuuden takia poikkileikkausprofiilin 76° :een vinoutuma vastasi hyvin sädeoptista mallia, jossa UV-säteiden etenemissuunnaksi kanavien ydinmateriaalina toimivassa SU-8 50TM-polymeerikalvossa yhtälön 2 perusteella saatiin $76,0^\circ$.

Valokanavien sivuseinämien karheuden tarkastetun tulokset ovat kuvassa 58, jonka perusteella valotusalueen keskikohdassa sijainneiden piirilevyjen sivuseinäämä on sileämpi kuin reunoilla ja kulmissa olleiden.



Kuva 58. Suurtuotantopaneelivalottimen eri kohdissa sijainneiden valokanavapiirilevyjen sivuseinämien tarkastelu 1500-kertaisella suurennoksella: kulmassa (a); keskikohdassa (b); ja reunalla (c).

Kuvassa 59 esitetty katkaisumenetelmän avulla saadut optiset vaimennusarvot. Paneelivalottimen kulmissa sijainneiden optisten piirilevyjen valokanavien vaimennukseksi saatiin 0,636 dB/cm, keskikohdassa valotettujen 0,5447 dB/cm ja reunoilla 0,5903 dB/cm.



Kuva 59. Valokanavien vaimennusarvot

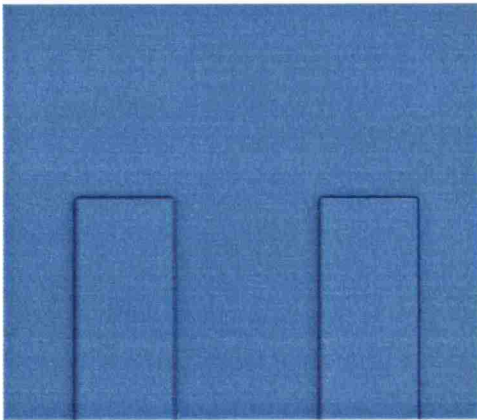
Toisaalta levyjen sisällä valokanavien vaimennusarvojen tulokset olivat erittäin homogeeniset, jolloin hajontaa samalla piirilevyllä olevien kanavasettien välillä ei juuri esiintynyt. Taulukossa 13 on esitetty mittaustulosten keskiarvot eri kanavien pituuksilla ja keskipoikkeama, joka osoittaa erinomaisen homogeenisuuden valokanavien vaimennusarvoissa, jossa L on mitattavan kanavan pituus yksikössä cm, KA on vaimennustuloksen keskiarvo yksikössä dB/cm ja KP on keskipoikkeama yksikössä dB/cm. Tarkat kanavakohtaiset katkaisumenetelmän avulla saadut arvot löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 13. Massavalottimella valmistettujen piirilevyjen valokanavien mittaustulosten yhteenveto.

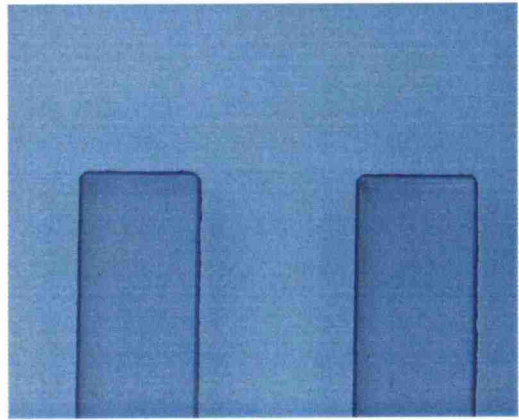
Piirilevyn sijainti suurtuotantovalottimen aktiivisella alueella valotuksen aikana:								
Kulma			Keskikohta			Reuna		
L	KA	KP	L	KA	KP	L	KA	KP
10	11,5	0,160	10	9,7	0,152	10	10,5	0,288
6,7	10,5	0,048	6,7	8,8	0,184	6,1	8,8	0,144
3	7,3	0,064	3	6,1	0,088	3	6,9	0,104

7.3 Kontaktittoman valotuksen testisarjan tulokset

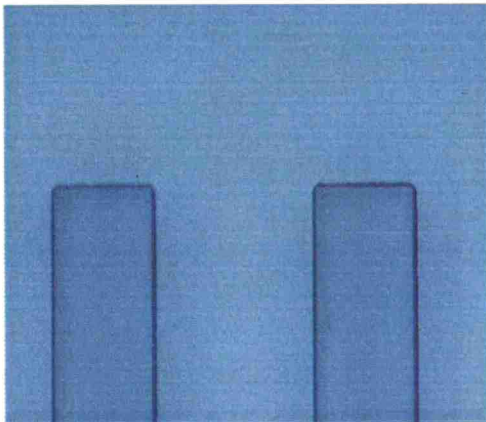
Testisarja K1R2 osalta saatiin kuvassa 60 esitetty valomikroskooppikuvat eri valotuserotuksilla valmistetuista kanavaytimistä.



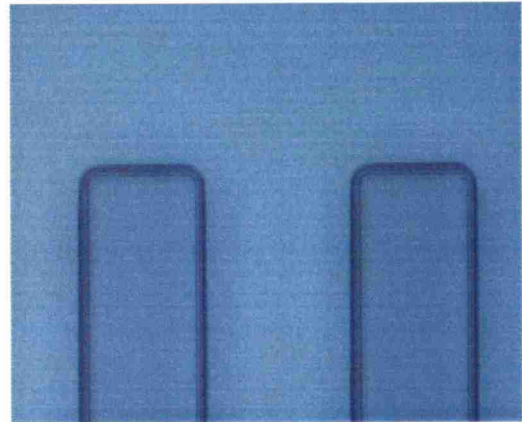
a)



b)



c)



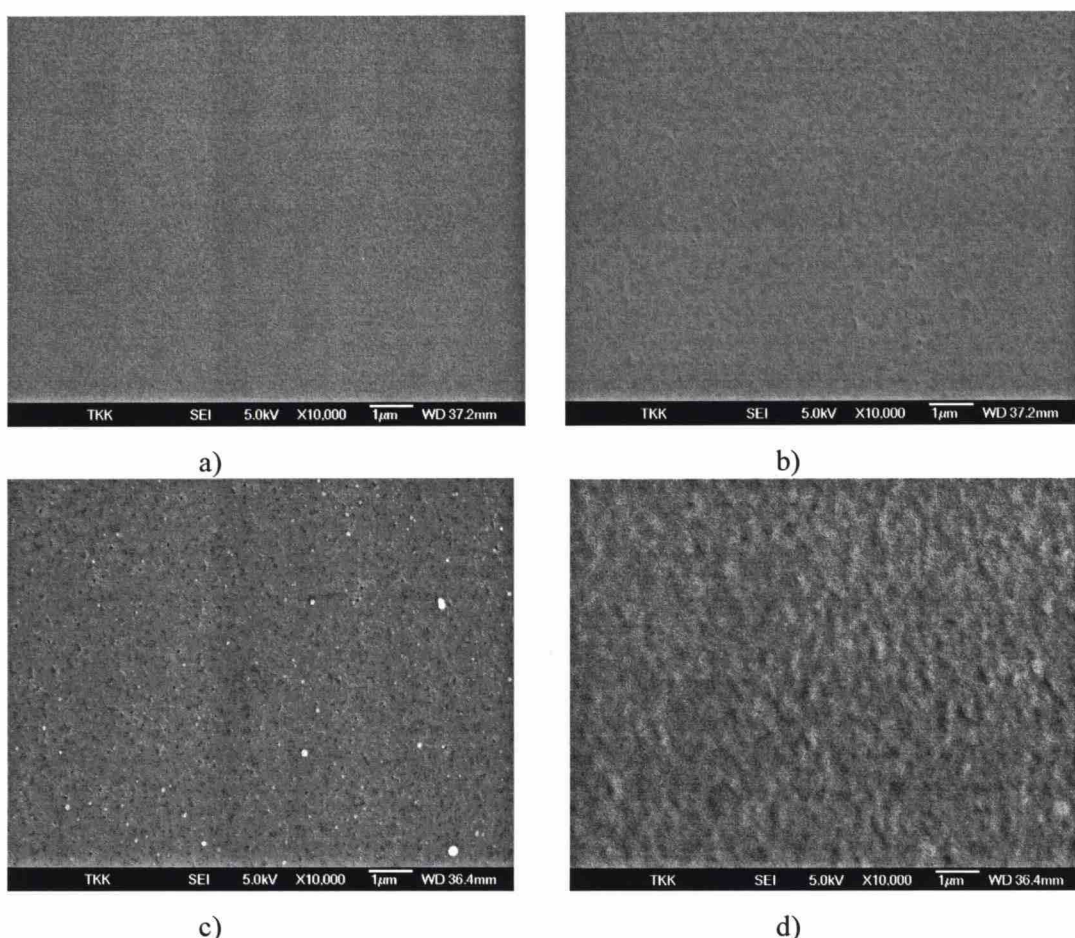
d)

Kuva 60. a) kontaktissa, b) 25, c) 50, ja d) 90 μm :n valotuserotuksella valmistettujen valokanavaytimet 20-kertaisessa suurennoksessa kuvattuja.

Kuva 60 perusteella nähdään 90 μm :n välyksellä valmistettujen valokanavaytimien epätarkan reunalaadun suhteessa muihin näytteisiin. Toisaalta 25 ja 50 μm :n erotusetäisyyksillä valotetuissa kanavissa ei ollut huomattavaa eroa joskin niiden resoluutio oli heikompi kuin kontaktissa valotetuissa kanavissa. Erojen löytämiseksi valokanavat tutkittiin SEM:n avulla.

Erityisen mielenkiintoista oli tutkia valotusmoodin vaikutusta kanavien sivuseinämien karheuteen, joiden oli osoitettu Oulu VTT:n OHIDA-projektin puitteissa suoritettujen simulointitulosten perusteella määräävän valokanavissa etenevän signaalin tehomenetyksiä varsinkin pitkissä siirroissa, joihin tässä diplomityössä valmistamat 10 cm:n kanavat voidaan lukea.

Kuvassa 61 tarkastellaan valokanavaytimien sivuseinämät 10000-kertaisella suurennoksella.

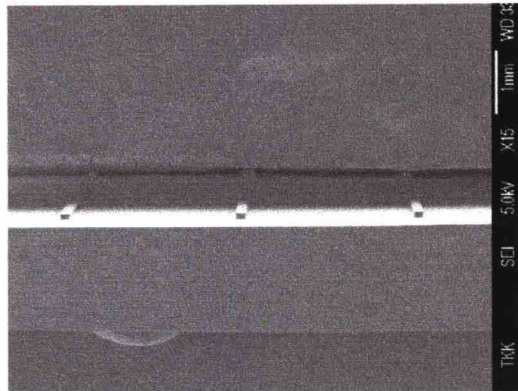


Kuva 61. a) kontaktissa, b) 25, c) 50, ja d) 90 μm :n valotuserotuksella valmistettujen valokanavaytimet 10000-kertaisella suurennoksella kuvattuja.

Kuvan 61 perusteella nähdään kontaktissa valotettujen kanavien sivuseinämän olevan selkeästi tasaisempi ja sileämpi muihin nähden 90 μm moodin ollessa heikoin.

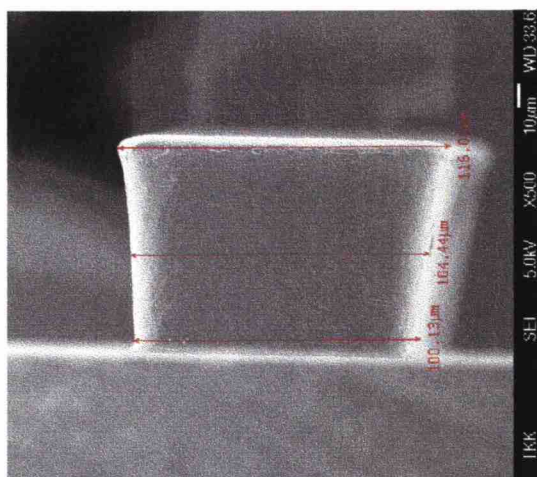
7.4 Kalvomaskin avulla paneelivalottimella valmistettujen valokanavapiirilevyjen mittatulokset

Kuvassa 62 on esitetty testisarjan K2OL2 kalvomaskin avulla valottimen aktiivisen alueen keskikohdassa valmistettujen kanavien yleisnäkymä.



Kuva 62: Kalvomaskivalokanavien yleisnäkymä.

Kuvassa 63 on 500-kertainen suurennos testisarjan K2OL2 kanavaytimen päädyistä, jonka avulla saatiin käsityksen kalvomaskin vaikutustekijästä valokanavien geometriseen muotoon ja toleransseihin.

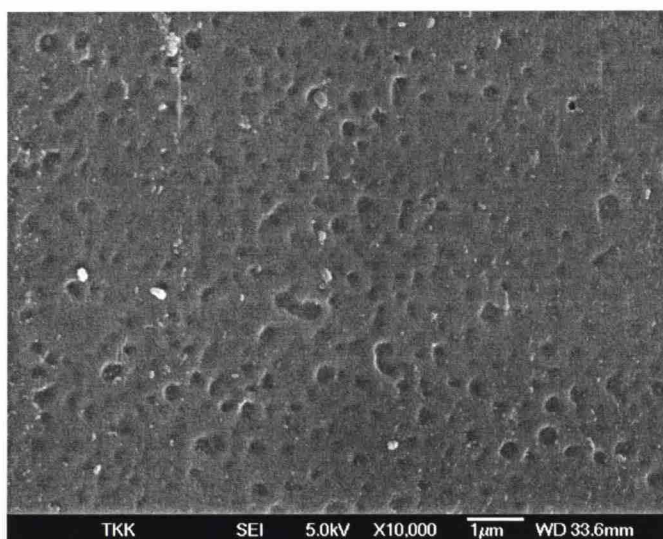


Kuva 63. Kalvomaskilla valmistetun valokanavapäädyn profiili.

Kuvan 63 perusteella valokanavan profiilissa on negatiivista seinämäkallistusta, mikä ei kuitenkaan kuvassa olevien mittojen perusteella johtunut ylietsautumisesta epäsovivien prosessiparametrien takia, sillä aivan alakuoren tuntumassa ytimen leveys vastaa kalvomaskin kuvion viivaleveyttä eli on 100 µm.

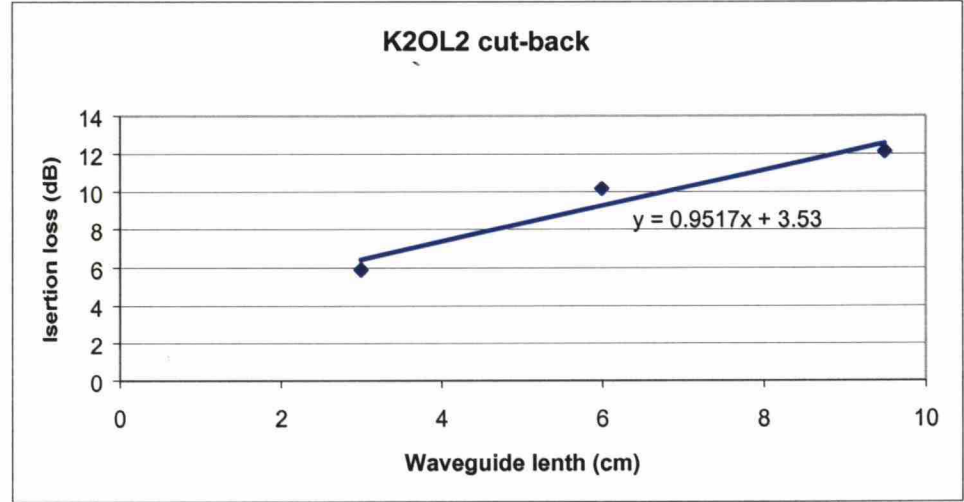
Kyseessä ei ole myöskään ylivalotus, sillä testisarjan K2OL1 perusteella tässä käytetyt parametrit soveltuvat täydellisesti kanavien valmistukseen. Koesarjassa K2OL2 eli kalvomaskilla valmistetuissa rakenteissa substraatille saapuvan UV-säteilyn intensiteetin 25%:n alentaminen johti alivalottuneisuudelle tyypillisiin virheisiin, kuten mikrohalkeiluun, joten valotusajan lyhentäminen estäisi lasi- ja kalvomaskien koesarjojen luotettavan vertailun. Kalvomaskin vaihtaminen uuteen johti samanlaiseen tulokseen.

Kuvassa 64 esitetty kalvomaskilla valmistetun koesarjan K2OL2 valokanavan sivuseinämän laatu.



Kuva 64. Kalvomaskilla valmistetun kanavan sivuseinämä.

Kuvassa 65 on kalvomaskilla tehtyjen valokanavien katkaisumenetelmän avulla saatu optisen vaimennusmittauksen tulokset. Valokanavien kaikki mittatulokset ovat liitteessä 2.



Kuva 65. Kalvomaskisarjan valokanavien vaimennustulokset

7.5 Testitulosten analysointi ja vertailu

Optimoitujen prosessiparametrien avulla valmistettiin testisarjan K2OL1 osalta vaimennukseltaan 0,5447 dB/cm olevat mr-L 6100/SU-8 50/mr-L 6100 monimuotovalokanavat, joiden VTT Oulussa prismamenetelmällä mitatun bulkkirakenteen vaimennus 0,38 dB/cm toimi nimellisenä tavoitearvona.

Nimellisen bulkkivaimennusarvon saavuttaminen ei ole mahdollista, sillä polymeerikalvon läpikäymät litografiaprosessin edellyttämät termisten ja kemiallisten käsittelyjen tuloksena muodostamat valokanavat sisältävät vaimennusta aiheuttavia rakenteellisia tekijöitä, joista sivuseinämän karheus on suurin yksittäinen valokanavan optista suoritusta heikentävä tekijä.

Näytesarjan K2OL1 perusteella havaittiin valolähteen kollimoimattomuuden vaikutus kanavien geometriseen muotoon, joka riippui testilevyjen sijainnista valottimen aktiivisella alueella suhteessa valolähteeseen. Valotusalueen keskellä eli lampun alapuolella valotettujen valokanavien profiilin olevan hyvin terävä ja tasasuunnikkaan muotoinen samoin kuin kollimoidulla mikropiirivalottimella tehdyissä valokanavissa.

Toisaalta paneelivalottimen aktiivisen alueen reunoilla ja kulmissa valotetuissa piirilevyissä valokanavien poikkileikkausprofiili muuttui johtuen levyille saapuvien säteiden tulokulmasta, mikä rekisteröitiin enimmillään 16°:een kallistumana kanavaytimien geometriassa. Toisaalta valottimen reuna- ja keskikohdassa valotettujen piirilevyjen valokanavien kohdalla mahdollisten optisten komponenttien liittäminen on mahdollista niin suora- kuin epäsuorakytkentätekniikoiden avulla.

Työssä käytetyn suurpinta-alavalottimen tuottaman valospektrin sisältämät alle 350 nm:n aallonpituudet eivät vaikuttaneet valokanavien geometriseen muotoon tai

suorituskykyyn vaimennustulosten osalta, mikä oli ennakko-oletusten vastainen havainto.

Toinen kollimoimattomalle suurtuotantovalotinyksikölle tyypillinen piirre eli pistemäisen valolähteen lähettämän UV-säteilyn intensiteetin ja tehon pientyminen siirtyessä tarjottimen keskikohdasta reunoja kohti ei myöskään aiheuttanut pienemmän valotusenergiamäärän saamissa näytteissä mitään alivalottumiseen liittyviä ongelmia.

Testisarjassa K2OL1 valmistettujen kanavien vaimennusmittaustulokset olivat hyvässä sopusoinnissa SEM:n avulla suoritettujen sivuseinämien laatutarkastelujen kanssa. Paneelivalottimen aktiivisen alueen keskikohdassa sijainneiden levyjen valokanavien vaimennus oli matalin eli 0,5447 dB/cm, jolloin myös niiden sivuseinäma oli SEM-kuvien perusteella tasaisin. Toiseksi pienin vaimennusarvo 0,5903 dB/cm saatiin reunalla sijainneiden piirilevyjen kanavilla, ja niiden sivuseinämän tasaisuus oli heikompi kuin keskikohdan näytteillä, mutta parempi kuin kulmissa valotetuilla, joiden arvo oli 0,636 dB/cm.

Näin ollen parhaan ja heikoimman tuloksen ero sarjassa K2OL1 oli vain 0,0913 dB/cm, mikä voi johtua myös mittausten menetelmän erottelutarkkuudesta. Samalta levyiltä tehtyjen kanavien vaimennusmittaustulosten hajonta oli kuitenkin pientä.

Katkaisumenetelmän avulla paneelivalottimella valmistetuille valokanaville saadut optisen vaimennuksen arvot olivat paremmat kuin referenssisarjan mikropiirivalottimella valmistetuilla. Referenssisarjan K1R1 vaimennustulos oli 0,6973 dB/cm.

Syynä näytesarjan K2OL1 valokanavien optisen suorituksen paremmuudelle suhteessa referenssisarjaan K1R1 arveltiin olevan lasimaskin ja substraatin välisen täydellisen kontaktin puute valotuksen aikana, koska piikiekkujen prosessointiin

tarkoitettu valotinyksikkö ei pystynyt joustamaan tarpeeksi epätasaiseksi tiedetyn FR-4 substraatin paksuusvaihteluiden mukaan.

Havainto varmistettiin erillisellä testillä. Kiillotetuille 4” piikiekoille valmistetussa testisarjassa K1R2 nähtiin, että valokanavien ytimenä toimivasta polymeeristä prosessoitujen kanavarakenteiden sivuseinämien laatu riippui selkeästi substraatin ja lasimaskin välisestä etäisyydestä valotuksen aikana. SEM-kuvien perusteella havaittiin että kontaktissa valotetulla rakenteella oli tasaisin ja silein sivuseinä. Reunan laatu heikkeni erotusetäisyyden funktiona.

Testisarja K2OL2:n tulosten pohjalta voidaan todeta lasimaskilla tehtyjen valokanavien toiminnallisen ja rakenteellisen etu kalvomaskilla tehtyjen kanavien suhteen. Koesarjan valokanavien lähes kaksinkertainen optisen vaimennuksen arvo 0,9517 dB/cm voidaan päätellä johtuvan heikosta sivuseinämän laadusta.

Kalvomaskin avulla tehdyissä valokanavissa havaittiin profiilin leviämistä. Tämä johtui siitä että kalvomaskin negatiivisen polariteetin alue aivan läpinäkyvien kanavakuvioiden vieressä päästi lävitseen pienen määrän UV-säteilyä valotuksen yhteydessä, jonka absorptio resistikerrokseen ja myöhempi jälkipaisto aiheuttivat kyseisen reunaepätasaisuuden. Kyseistä tilannetta ei havaittu lasimaskilla mikropiiriteollisuuden suurtuotantoyksiköiden valmistamista näytteistä, kuten diplomityön koesarjojen K1R1 ja K2OL1 kanavien profiilikuvat osoittavat. Uuden kalvomaskin valmistaminen ja käyttö ei tuottanut mitään muutosta.

Valokanavapiirilevyn valmistusprosessin kehitystyön pohjalta voidaan todeta alakuoren valmistuksessa selkeästi kriittisen vaiheen olevan resistin levityksen jälkeinen esipaisto, johon tulisi kiinnittää erityistä huomiota optisten piirilevyjen mahdollisessa teollisuusmittakaavassa tapahtuvassa massavalmistuksessa valolitografisin menetelmin. Prosessointilämpötilojen porrastaminen osoittautui keskeiseksi tekijäksi optimaalisten parametrien määrittämisessä.

Muiden alakuoren prosessivaiheiden kohdalla prosessi-ikkuna on laajempi varsinkin valotuksen ja jälkipaiston osalta.

Valokanavaytimien prosessointi oli huomattavasti vaativampi prosessivaihe, jolloin oli tärkeä löytää optimaalisen valotus/jälkipaisto/kehitys-suhteen. Kokeissa kriittisimmäksi tekijäksi osoittautui valotusparametri, jonka optimiarvosta poikkeaminen johti piirilevyjen toimimattomuuteen kanavassa etenevän signaalin liiallisen vaimentumisen muodossa.

Yläkuoren tapauksessa valokanavaytimien täydellinen peittyminen osoittautui tärkeimmäksi vaiheeksi, jonka optimoimiseksi säädettiin levitysreseptiä. Toisaalta myös polymerointiprosessin kontrollointi ja tasapainottaminen oli tärkeä osa valokanavapiirilevyn luotettavan toiminnan kannalta.

8 Yhteenveto

Diplomityön tavoitteena oli tutkia litografisesti tapahtuvan optisten piirilevyjen massavalmistuksen edellytyksiä valotuslaitteiston osalta. Valokanavien valmistuksessa käytettiin samaan epoksiperheeseen kuuluvat valokuvioituvat polymeerit, jolloin minimoitiin materiaalien yhteensopimattomuudesta johtuvia prosessointiongelmia.

Valokanavat valmistettiin litografisesti ytimenpeittomenetelmällä eri valotusyksiköillä. Mikropiirivalottimella tehdyt valokanavapiirilevyt toimivat vertailunäytteinä paneelivalottimella valmistetuille näytteille. Työssä tutkittiin myös filmimaskin soveltuvuutta valokanavapiirilevyjen valmistukseen sekä kontaktittoman litografian vaikutusta kanavien suorituskyykyyn. Lisäksi määritettiin kriittiset valmistusparametrit valokanavarakenteen jokaiselle optiselle kerrokselle.

Eri valmistustyökalujen ja –prosessiparametrien vaikutukset valokanavien muotoihin, toleransseihin ja sivuseinämien laatuun tutkittiin optisella ja pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Kanavien suorituskyyky mitattiin katkaisumenetelmän avulla. Valmistusprosessin optimoinnissa käytettiin ANOVA-menetelmää, jonka avulla pystyttiin osoittamaan prosessivaiheiden muutosten vaikutukset lopputulokseen.

Paneelivalottimella valmistetut testisarjat osoittivat sen, että piirilevyvalmistajille tyypillinen paneelivalotin soveltuu valokanavia sisältävien optisten piirilevyjen valmistukseen ainakin vaimennustulosten osalta. Toisaalta kollimoimattoman valolähteen aiheuttamat muutokset valokanavien muotoihin on otettava huomioon mahdollisessa komponenttien kohdistuksessa ja ladonnassa optisen polttopisteen siirtymisen takia.

Paneelivalottimella valmistettujen epoksipolymeerivalokanavien vaimennusarvot olivat lähellä nimellistä bulkkivaimennusarvoa. Samalla piirilevyllä olevien valokanavien vaimennustulosten vähäinen hajonta osoitti osaltaan valmistusprosessin toistettavuuden.

Prosessoitavien piirilevyjen kuviointialueiden ja maskin välinen kontakti osoittautui tärkeäksi tekijäksi, joka vaikutti ytimen sivuseinämän laatuun. Paneelivalotin mahdollisti paremman kontaktin muodostumisen, jonka puute mikropiirivalottimen tapauksessa johti vertailunäytesarjan suurempiin vaimennusarvoihin.

Kalvomaskien käyttö valokanavien valmistuksessa vaatisi ehdottomasti UV-säteilyn läpäisevyyden täydellisen estämisen negatiivisen polariteetin alueilta. Toisaalta työssä ei ollut käytettävissä muiden valmistajien kalvomaskeja, joten niiden prosessisoveltuvuuden suhteen lopullisten johtopäätösten muodostaminen ei ole mahdollista.

Työssä valmistettujen kanavarakenteiden prosessointi-ikkuna osoittautui muiden kuin kriittisten vaiheiden kohdalla suhteellisen laajaksi. Optisten kerrosten kriittisten vaiheiden vaikutus oli kuitenkin avainasemassa valokanavien kyvyllä toimia signaalin siirtoväylinä.

Lähdeluettelo

/1/ Min-Cheol Oh Min-Cheol Oh; Cheng Zhang; Hyung-Jong Lee; Steier, W.H.; Fetterman, H.R. ” Low-loss interconnection between electrooptic and passive polymer waveguides with a vertical taper”, Photonics Technology Letters, IEEE Volume: 14 , Issue: 8 , Aug. 2002 Pages:1121 - 1123

/2/ Schmieder, K.; Wolter, K.-J, “Electro-optical printed circuit board (EOPCB)”, Electronic Components and Technology Conference, 2000. 2000 Proceedings 50th, 21-24 May 2000, Pages:749 – 753

/3/ Liu F.; Guidotti D.; Sundaram V.; Mahajan S.; Huang Z.; Chang Y. –J.; Chang G. K.; Tummala R. R., “Material and process challenges in embedding polymeric waveguides and detectors in system on package (SOP)”, IEEE 9th Int’l Symposium on Advanced Packaging Materials, 2004, ss. 89-94

/4/ Kurata K., “Mass production techniques for optical modules”, IEEE Electronic Components and Technology Conference, 1998, ss. 572-580

/5/ Liu, Y.S.; Wojnarowski, R.J.; Hennessy, W.A.; Piacente, P.A.; Rowlette, J., Jr.; Kadar-Kallen, M.; Stack, J.; Yue Liu; Peczalski, A.; Nahata, A.; Yardley, J. “Plastic VCSEL array packaging and high density polymer waveguides for board and backplane optical interconnect”, 48th IEEE Electronic Components and Technology Conference, 1998, ss. 999-1005

/6/ Sullivan, C.T.; Booth, B.L.; Husain, A.; ”Polymeric waveguides”, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, No 1, January 1992, ss. 27-33

/7/ Goodwill, D.J.; Fan, R.S.; Hooker, R.B.; Yung-Cheng Lee; McComas, B.L.; Mickelson, A.R.; Morozova, N.D.; Tomic, D., “Polymer tapered waveguides and flip-chip solder bonding as compatible technologies for efficient OEIC coupling”, IEEE Proceedings of 47th Electronic Components and Technology Conference, May 1997, ss. 788-796

/8/ Eldada, L.; Shacklette, L.W, “Advances in Polymer Integrated Optisc”, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No 1, January-February. 2000, ss. 54 - 68

/9/ Schröder, H.; Bauer, J.; Ebling, F.; Scheel, W., “ Polymer Optical Interconnections for PCB”, Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, 2001. First International IEEE Conference on ,21-24 Oct. 2001, Pages:337 – 343

/10/ Griesse E., “A high-performance hybrid electrical-optical interconnection technology for high-speed electronic systems”, IEEE Transactions on Advanced Packaging, August 2001, Vol. 24, No 3 , ss. 375 - 383

/11/ Ramaswami R., Sivarajan K. N., ” Optical networks : a practical perspective”, San Francisco Kaufmann, 2002

/12/ Chen, R.T.; Lei Lin; Chulchae Choi; Liu, Y.J.; Bihari, B.; Wu, L.; Tang, S.; Wickman, R.; Picor, B.; Hibb-Brenner, M.K.; Bristow, J.; Liu, Y.S., “Fully embedded board-level guided-wave optoelectronic interconnects”, Proceedings of the IEEE ,Volume: 88 , Issue: 6 , June 2000 Pages:780 - 793

/13/ Ministry of Education and Communication, Radio for Education and Research, Etelä-Korea, 18.01.2005,
http://rerc.icu.ac.kr/UploadFile/Lecture_work/040331_02.pdf

/14/ Zenphotonicsin kotisivu, tuoteluettelo ja -kuvaukset, 18.01.2005,
<http://www.zenphotonics.com>

/15/ Immonen M.; Wu J.; Karppinen M.; Kivilahti J., "Fabrication and Characterization of Polymer Optical Waveguides with Integrated Micromirrors for Three-Dimensional Board-Level Optical Interconnects", (To be published), 2005.

/16/ Franssilan S., Introduction to Microfabrication, Wiley 2004

/17/ Bona G.L.; Offrein B.J.; Baps U.; Berger C., "Characterization of parallel optical-interconnect waveguides integrated on a printed circuit board", IMB tutkimusraportti, RZ 3543 (# 99555).

/18/ Kurssin S-45.151 Elektroniikan materiaalit luentomoniste, Edita Oy, Espoo, kevät 2001

/19/ Coombs C. F. Jr., Printed Circuits Handbook, 5th Edition, McGraw-Hill, 2001

/20/ Tibbals S., "Application methods and their influence on solder mask processing", Circuitree kotisivut, 11.09.2004,
http://www.circuitree.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP__Features__Item/0,2133,75919,00.html

/21/ NANOTM SU-8, "Negative tone photoresist formulations 2-25" ja "Negative tone photoresist formulations 50-100", MicroChem, 11.09.2004,
www.microchem.com/products/pdf/

/22/ DI Marika Immosen kanssa käymä suullinen keskustelu 01.12.2004 ja sähköpostien vaihto 10.02.2005, Elektroniikan valmistustekniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu

/23/ Waters D., An introduction to supply chain management, Palgrave MacMillan, 2003

/24/ OHIDA – Optics on future printed circuit boards in high speed data transmission applications, “Technology evaluation report of optical interconnections and enabling technologies 2002”, Helsinki University of Technology and VTT, WP 1, Chapters 3,6,7,9

/25/ Lee Byung-Tak, Min-Suk Kwon, Jun-Bo Yoon, Sang-Yung Shin, ”Fabrication of polymeric large-core waveguides for optical interconnects using a rubber molding process”, IEEE Photonics Technology Letters, 2000, Vol. 12, No 1, ss. 62-64

/26/ Booth Bruce L, ”Low loss channel waveguides in polymers”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 7, No 10, October 1989, ss. 1445-1453

/27/ Despont M.; Lorenz H.; Fahrni N.; Brugger J.; Renaud P.; Vettiger P., ”High-aspect-ratio ultrathick, negative-tone near-UV photoresist for MEMS applications”, IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems MEMS’97, January 1997, ss. 518-522

/28/ Usui M., Makoto H., Watanabe T., Amano M., Sugawara S., Hayashida S., Imamura S., ”Low-Loss Passive Polymer Optical Waveguides with High Environmental Stability”, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, Issue 10, October 1996, ss. 2338-2343

/30/ Krabe D.; Ebling F.; Arndt-Staufenbiel N.; Lang G.; Scheel W., "New technology for electrical/optical systems on module and board level: the EOCB approach", IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2000, ss. 970-974

/31/ Ishii, Y.; Koike, S.; Arai, Y.; Ando, Y., "SMT-compatible large-tolerance "OptoBump" interface for interchip optical interconnections", Advanced Packaging, IEEE Transactions, Volume: 26 , Issue: 2 , May 2003 Pages:122 - 127

/32/ MEMS Optical INC., kotisivut, 8.03.04

<http://www.memsoptical.com/prodserv/products/microlensar.htm>

/33/ Xiao Cong Yuan, W. X. Yu, N. G. Ngo, W. C. Cheong, " Cost-effective fabrication of microlenses on hybrid sol-gel glass with a high-energy beam-sensitive gray-scale mask", Optics Express, April 2002, Vol. 10, No 7. ss 303-307

/34/ Ishii Y.; Tanaka. N.; Sakamoto. T.; Takahara H., "Fully SMT-compatible optical-I/O package with microlens array interface", Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, No. 1, January 2003, ss. 275-280

/35/ Teknillisen korkeakoulun mikroelettroniikkakeskuksen Micronovan kotisivu, 24.01.2005, <http://www.hut.fi/Units/MEC/>

/36/ Gan J., Wu L., Luan H., Bihari B., and Chen R.T., 'Two-Dimensional 45 surface-normal microcoupler array for guided-wave optical clock distribution', IEEE Photon. Tech. Lett. 11, 1999, ss. 1452-1454

/37/ Hikita M., Tomaru S., Enbutsu K., Ooba N., Yoshimura R., Usui M., Yoshida T., and Imamura S., "Polymeric Optical Waveguide Films for Short-Distance Optical Interconnects", IEEE J. of Selected Topics in Quan. Elec. 5, 1999, ss. 1237-1242

/38/ Kagami M., Kawasaki A. and Ito H., "A Polymer Optical Waveguide With Out-of-Plane Branching Mirrors for Surface-Normal Optical Interconnections", J. Lightwave Technol. 19, 2001, ss. 1949–1955

/39/ Mickelson A. R., Basavanhally N. R., Lee Y. –C., Optoelectronics Packaging, John Willey Sons Inc., New York, 1997

/40/ Zhang C.; Yang C.; Ding D., "Deep reactive ion etching of commercial PMMA on O_2/CHF_3 , and O_2/Ar -based discharges", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, ss. 663-666

/41/ Furuya A.; Shimokawa F.; Matsuura T.; Sawada R., "Fabrication of fluorinated polyimide microgrids using magnetically controlled reactive ion etching (MC-RIE) and their applications to an ion drag integrated micropump", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 6, 1996, ss. 310-319

/42/ Kim J.-H.; Chen R.T., "A collimation mirror in polymer planar waveguide formed by reactive ion etching", IEEE Photonics Technology Letter, Vol.15, No 3, March 2003, ss. 422-424

/43/ Chelnokov, A.V.; Lourtioz, J.-M.; Electronics Letters , Feb. 1995, Vol. 31 , No 4, ss. 269 – 271

/44/ Georgian University of Technology, USA, projektisivut, 01.01.2005,
<http://www.prc.gatech.edu/events/dls/raychen.pdf>

/46/ Bierhoff T., Wallrabenstein A., Himmler A., Griesse E., Mrozynski G., "An approach to model wave propagation in highly multimodal optical waveguides with

rough surfaces”, Proc. Int. Symp. Theoret. Elect. Eng. (ISTET 99), Magdurg, Germany, pp. 515-520, 1999

/47/ Texasin Austin yliopiston tohtori R. T. Chanin tutkimusryhmän kotisivut, 03.03.2004, <http://www.ece.utexas.edu/projects/ece/mrc/groups/optic-inter/>

/48/ Rick L., “Optical Interconnects in high-performance computing systems”, May 2002, <http://research.sun.com/people/lytel/Light-matters-2000.pdf>

/49/ Mode MicroOptical Devices, 8085-1100 VCSEL Datasheet, 03.03.2004

/50/ European Commisison, ESPRIT programme, Microelectronics Andvanced Research Initiative Mel-Ari Opto Project 3, 03.04.2004, <http://www.cordis.lu/esprit/src/melari.htm>

/51/ European Commisison, ESPRIT programme, “ Microelectronics Andvanced Research Initiative Mel-Ari Opto Project 2”, ss 21-35, 03.04.2004 <http://www.cordis.lu/esprit/src/melari.htm>

/52/ Jelley, K.W.; Valliath, G.T.; Stafford, J.W., “High-speed chip-to-chip optical interconnect”, Photonics Technology Letters, IEEE ,Vol. 4 ,No. 10 , October 1992, ss.1157 - 1159

/53/ Sakatsu, T.; Yoshida, Y.; Iwafuchi, T.; Kuwazaki, S.; Sarayama, S.; Iw, H.; “High accuracy face down bonding with micro-ball alignment” Electronic Manufacturing Technology Symposium, 1995, Proceedings of 1995 Japan International, 18th IEEE/CPMT International , 4-6 Dec. 1995 ss. 287 – 290

/54/ Rowlette J.R “Laser micromachining of polymer waveguides for low cost passive alignment to VCSELs” IEEE, vol 2, 1996

/55/ Armiento, C.A.; Tabasky, M.; Jagannath, C.J.; Fitzgerald, T.W.; Shieh, C.L.; Barry, V.; Rothman, M.; Negri, A.; Haugsjaa, P.O.; Lockwood, H.F.; "Passive coupling of InGaAsP/InP laser array and singlemode fibres using silicon waferboard", Electronics Letters ,Volume: 27 , Issue: 12 , 6 June 1991 Pages:1109 - 1111

/56/ Ishii, Y.; Koike, S.; Arai, Y.; Ando, Y., "SMT-compatible large-tolerance "OptoBump" interface for interchip optical interconnections", Advanced Packaging, IEEE Transactions, Volume: 26 , Issue: 2 , May 2003 Pages:122 - 127

/57/ Griese E., "Optical Interconnection Technology for PCB Applications", Journal of PCB Fabrication, June 2002

/58/ Reed G. T., "Methods of measurement of passive integrated optical waveguides", IEE Colloquium on Measurements on Optical Devices, November 1992, ss. 2/1 - 2/7

/59/ Okamura Y.; Yoshinaka S.; Yamamoto S., "Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides: a simple method", Applied Optics, Vol. 22, No. 23, December 1983, ss. 3892-3894

/60/ Okamura Y.; Miki A.; Yamamoto S., "Observation of wave propagation in integrated optical circuits", Applied Optics, Vol. 25, No. 19, October 1986, ss. 3405-3408

/61/ Dutta S.; Jackson H. E.; Boyd J. T.; Davies F. S.; Hickernell F. S., CO₂ laser annealing of Si₃N₄, Nb₂O₅ and Ta₂O₅ thin-film optical waveguides to achieve scattering loss reduction", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 12, No. 12, 1982, ss. 800-805

/62/ Boertjes D. W.; McMullin J. N.; Keyworth B. P., "Graded effective index planar polymer waveguides", IEEE Journal of Lightwave technology, Vol. 14, No. 12, December 1996, ss. 2714-2718

/63/ Okamura Y.; Sato S.; Yamamoto S., "Simple method of measuring propagation properties of integrated optical waveguides: an improvement", Applied Optics, Vol. 24, No.1, January 1985, ss. 57-60

/64/ Phelps, C.W.; Barry, T.S.; Rode, D.L.; Krchnavek, R.R.; "Low-loss, single-mode, organic polymer waveguides utilizing refractive index tailoring", Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 10, October 1997, ss. 1900-1905

/65/ Haruna, M.; Segawa, Y.; Nishihara, H., "Nondestructive and simple method of optical-waveguide loss measurement with optimisation of end-fire coupling", IEEE Electronics Letters, Vol. 28, No. 17, August 1992, ss. 1612-1613

/66/ OHIDA – Optics on future printed circuit boards in high speed data transmission applications, "Technology evaluation report of optical interconnections and enabling technologies 2002", Helsinki University of Technology and VTT, WP 1, Chapter 6

/67/ Brannon P. J., "Improved method of measuring optical waveguide propagation losses", Applied Optics, Vol. 25, No. 20, October 1986, ss. 3596-3601

/68/ Elektroniikan valmistustekniikan laboratorion/Andrei Ollikaisen kuva, Teknillinen korkeakoulu, 08.10.2004

/69/ Stanowski, R.; Rieske, R.; Patela, S.; Wolter, K.-J., "Thermal analysis of integrated polymer waveguides", IEEE 26th International Spring Seminar on Electronics Technology: Integrated Management of Electronic Materials Production, May 2003, ss. 227-231

/70/ Veeco mittauslaitteiden valmistajan kotisivut, 27.08.2004,

http://www.veeco.com/html/product_bymarket_proddetail.asp?productID=200&MarketID=4&Title=Optical%2FStylus+Products

/71/ Xiao T.; Yuan Y.; Wongchotigul K.; Spencer M. G., "Dispersion properties of aluminium nitride as measured by an optical waveguide technique", Applied Physics Letters, Vol. 70, No. 24, June 1997, ss. 3206-3208

/72/ Dogheche E.; Jaber B.; Remien D., "Optical waveguiding in epitaxial PbTiO₃ thin films", Journal of Applied Optics, Vol.37. No. 19, July 1998, ss. 4245- 4248

/73/ Bai S. J.; Spry R. J.; Zelmon D. E.; Ramabadran U.; Jackson J., "Optical Anisotropy of Polymeric Films Measured by Waveguide Propagation Mode Determination," Journal of Polymer Science, Val. 30, ss. 1507-1509, 1992

/74/ Sharda T.; Soga T.; Jimbo T.; "Optical properties of nanocrystalline diamond films by prism coupling technique", Journal of Applied Physics, Vol. 93, No. 1, January 2003, ss. 101-105

/75/ Mittauslaitteiden valmistajan Metriconin kotisivut, 09.08.2004

<http://www.metricon.com/appli5.htm#anchor480218>

/76/ Ulrich R.; Torge R., "Measurement of thin film parameters with a prism coupler", Journal of Applied Optics, Vol. 12, No. 12, December 1973, ss. 2901-2908

/77/ Weber H. P.; Dunn F. A.; Leibolt W. N., "Loss measurement in thin-film optical waveguides", Journal of Applied Optics, Vol. 12, No. 4, April 1973, ss. 755- 757

/78/ Cargille Labs kotisivut, 09.08.2004,
<http://www.cargille.com/refractivestandards.shtml>

/79/ Teng C.-C., "Precision measurement of the optical attenuation profile along the propagation path in thin-film waveguides", Journal of Applied Optics, Vol. 32, No. 7, March 1993, ss. 1051-1054

/80/ Yariv A.; Yeh P., Optical Waves in Crystals, Wiley New York, 1984, ss. 422-424

Liitteet

Liite 1

Koesarjan K2OL1 valokanavapiirilevyjen vaimennustulokset.

Reuna		Kulma		Keskikohta	
9,1 cm		9,7 cm		9,7 cm	
	loss [dB]		loss [dB]		loss [dB]
#1	10,6	#1	11,3	#1	10,1
#2	10,3	#2	11,6	#2	9,7
#3	10,1	#3	11,7	#3	9,5
#4	10,5	#4	11,6	#4	9,6
#5	11,2	#5	11,3	#5	9,7
avg	10,5	avg	11,5	avg	9,7
keskipoikkeama	0,288		0,16		0,152
6,1 cm		6,7 cm		6,7 cm	
	loss [dB]		loss [dB]		loss [dB]
#1	9	#1	10,5	#1	9,1
#2	8,9	#2	10,4	#2	8,9
#3	8,6	#3	10,5	#3	8,5
#4	8,6	#4	10,5	#4	8,6
#5	8,8	#5	10,4	#5	8,8
avg	8,8	avg	10,5	avg	8,8
keskipoikkeama	0,144		0,048		0,184
3 cm		3 cm		3 cm	
	loss [dB]		loss [dB]		loss [dB]
#1	7	#1	7,3	#1	6,2
#2	6,9	#2	7,2	#2	6
#3	6,7	#3	7,4	#3	5,9
#4	6,8	#4	7,4	#4	6,1
#5	7	#5	7,3	#5	6,1
avg	6,9	avg	7,3	avg	6,1
keskipoikkeama	0,104		0,064		0,088

Liite 2

Koesarjan K2OL2 valokanavapiirilevyjen vaimennustulokset.

Kanava:	9,5 cm	loss [dB]	6 cm	loss [dB]	3 cm	loss [dB]
1	54	11,97025166	86	9,949205	210	6,071996
2	55	11,89056236	85	10	215	5,969805
3	53	12,05143056	84	10,0514	215	5,969805
4	53	12,05143056	84	10,0514	220	5,869962
5	54	11,97025166	83	10,10341	217	5,929592
6	50	12,30448921	81	10,20934	220	5,869962
7	62	11,37027236	85	10	220	5,869962
8	43	12,9595047	55	11,89056	225	5,772364
9	55	11,89056236	84	10,0514	219	5,889748
10	54	11,97025166	85	10	220	5,869962
11	53	12,05143056	84	10,0514	225	5,772364
12	50	12,30448921	84	10,0514	229	5,695834
13	49	12,39222846	85	10	226	5,753105
14	49	12,39222846	85	10	229	5,695834
15	47	12,57321068	83	10,10341	200	6,283889
avg	52,06667	12,14283963	82,2	10,16753	219,3333	5,885612
keskipoikkeama		0,275881724		0,235313		0,106821

